

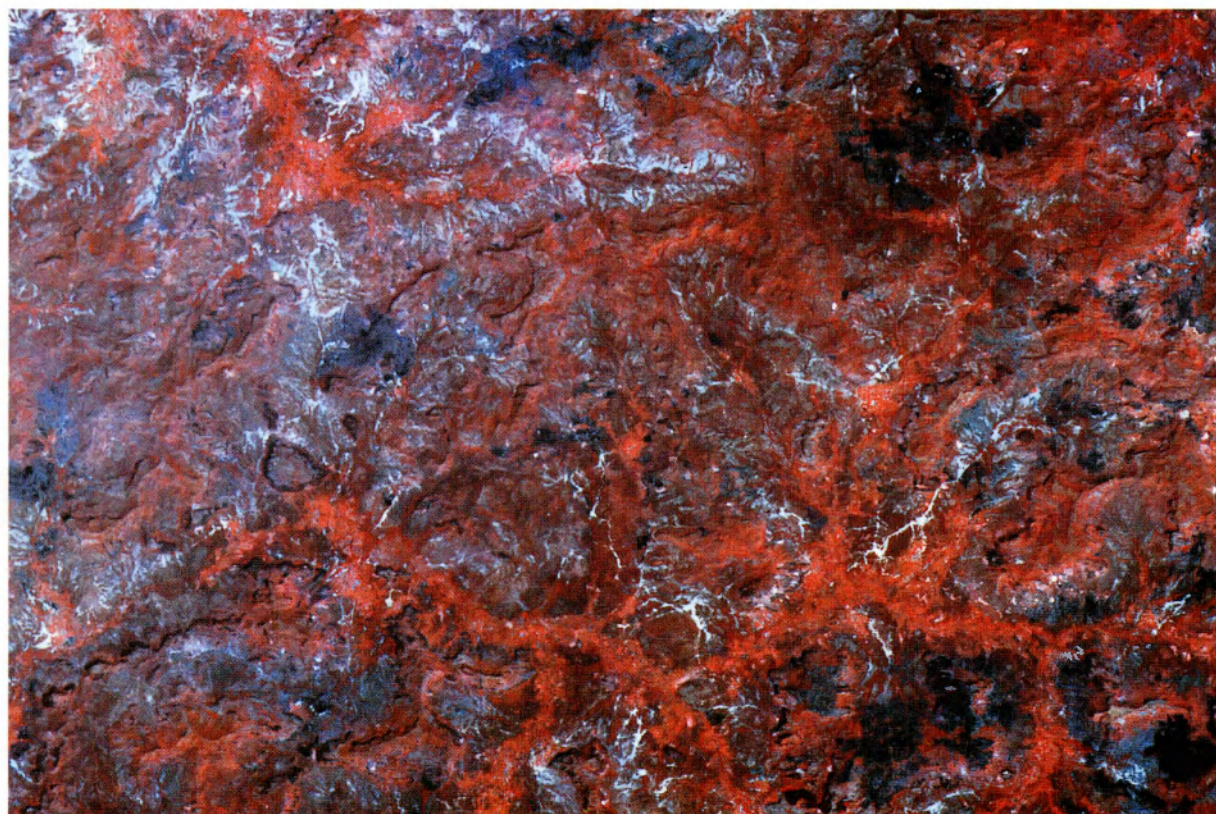
**MINISTÈRE CHARGÉ DES RESSOURCES
NATURELLES ET DE L'ÉLEVAGE**
Direction Nationale des Eaux et Forêts

RÉPUBLIQUE DU MALI
"Un peuple, un but, une foi"

**PROJET INVENTAIRE
DES RESSOURCES LIGNEUSES AU MALI**

PHASE B

SYNTHÈSE TECHNIQUE



**BDPA - SCET - AGRI
CTFT (Département du CIRAD)
SYSAME**

**Étude financée par le
Ministère de la Coopération et du
Développement de la République Française**

Septembre 1991

**MINISTERE CHARGE DES RESSOURCES
NATURELLES ET DE L'ELEVAGE
Direction Nationale des Eaux et Forêts**

**REPUBLIQUE DU MALI
"Un peuple, un but, une foi"**

**PROJET INVENTAIRE DES RESSOURCES LIGNEUSES
AU MALI**

Phase B

SYNTHESE TECHNIQUE

BDPA-SCET-AGRI
27, Rue Louis Vicat
75737 PARIS Cedex 15

CTFT (Département du CIRAD)
45 Bis, Avenue de la Belle Gabrielle
94736 NOGENT SUR MARNE Cedex

SYSAME
Les Algorythmes, Route des Lucioles
Sophia Antipolis 06560 VALBONNE

Etude financée par le Ministère
de la Coopération et du
Développement de la République
Française

Septembre 1991

SOMMAIRE

	Pages
RESUME	
PRESENTATION ET UTILISATION DU PRESENT RAPPORT	
Chapitre 1 METHODOLOGIE DE L'INVENTAIRE	1
1 <u>RAPPEL DES OBJECTIFS</u>	2
2 <u>PRESENTATION DU PROJET</u>	2
21 Financement.	2
22 Mise en oeuvre du projet et intervenants	2
23 Déroulement du projet.	4
24 Localisation géographique.	4
3 <u>METHODOLOGIE ET ACQUIS DE LA PHASE A</u>	4
31 Stratification préliminaire de la végétation du Mali	4
32 Sélection de 16 zones-tests.	4
33 Sur chacune des zones-tests, photo-interprétation et cartographie	4
34 Inventaire de terrain.	4
4 <u>METHODOLOGIE ET ACQUIS DE LA PHASE B</u>	5
41 Acquisition des images du satellite SPOT	5
42 Exploitation de l'imagerie du satellite SPOT	5
43 Contrôles de terrain et sondages complémentaires	6
44 Cartographie définitive.	6
45 Présentation des données de l'inventaire	6
5 <u>CONCLUSIONS</u>	7
 Chapitre 2 TELEDETECTION	 8
1 <u>METHODOLOGIE D'EXPLOITATION DES IMAGES SATELLITES</u>	9
11 Les raisons du choix de l'interprétation visuelle (ou analogique).	9

12	Supports utilisés.	10
13	Méthode d'exploitation des images SPOT	10
14	Interprétation préliminaire.	11
15	Choix de la période optimum d'acquisition d'images SPOT pour la cartographie des formations ligneuses	13
151	Antécédents.	13
152	Objectif de ce projet.	13
153	Contraintes liées aux conditions météorologiques	15
154	Contraintes liées aux feux de brousse.	15
155	Conclusions.	19
2	<u>TELEDETECTION ET APPROCHE MORPHOPÉDOLOGIQUE DU MILIEU NATUREL .</u>	20
21	Objectifs.	20
211	Les besoins de l'inventaire des ressources ligneuses	20
212	Les besoins de la cartographie de l'occupation agricole des terres	20
22	Mise en oeuvre de l'approche morphopédologique	21
	Concepts utilisés.	21
23	Cartographie morphopédologique. Légende générale des cartes	23
24	Cartographie morphopédologique. Légendes particulières	26
	Chapitre 3 TELEDETECTION ET CARTOGRAPHIE DE LA VEGETATION	33
3	<u>TELEDETECTION ET CARTOGRAPHIE DE LA VEGETATION.</u>	34
31	Méthodologie	34
32	Critères de définition des unités de la carte de la végétation	37
33	Cartographie de la végétation - Légende générale	40
34	Cartographie de la végétation - Légendes particulières	46
	Chapitre 4 CONTROLE DE TERRAIN TRAITEMENT DES DONNEES	52
41	Les différents niveaux de stratification de l'inventaire	53
411	Constitution de données de référence	53
412	Généralisation de l'inventaire	55
413	Description d'une unité cartographique	56
42	Méthodes d'inventaire complémentaire de terrain.	56
421	Données acquises lors de la première phase de l'inventaire	56
422	Contrôles de terrain de la deuxième phase de l'inventaire	56
423	Réalisation pratique - Ratios.	60

43	Estimation du taux de sondage.	66
Chapitre 5 TELEDETECTION ET CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION AGRICOLE DES TERRES		67
5	<u>TELEDETECTION ET CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION AGRICOLE DES TERRES.</u>	68
51	Objectifs.	68
52	Méthodologie et limite de fiabilité de l'information	68
53	Principales caractéristiques des systèmes d'occupation agricole des terres cartographiées	68
531	Systèmes associés aux alluvions et zones humides	68
532	Systèmes mixtes, cultures sur alluvions et zones humides et cultures en sec	72
533	Systèmes de cultures en sec.	73
534	Zones incultes ayant localement une potentialité agricole (sous réserve de contrôle de terrain et de la nécessité de préserver l'environnement).	76
535	Aptitudes agricoles des unités cartographiques correspondant aux systèmes cultureux pratiqués sur les zones humides, inondables, alluvions et bas-fonds. . . .	77
536	Unités cartographiques correspondant aux systèmes de culture en sec	78
Chapitre 6 DESCRIPTION DES PAYSAGES VEGETAUX.		80
6	<u>DESCRIPTION DES PAYSAGES VEGETAUX</u>	81
61	Paysages associés aux chenaux longitudinaux du lit majeur du Niger et/ou du Bani (unités cartographiées : P11.2 et P11.3).	81
62	Paysages associés aux plaines d'inondations des grands cours d'eau (unités cartographiées : P12.1, P12.2, P12.3, P12.4 et P12.5)	82
63	Paysages associés aux systèmes de mare temporaire (unité cartographiée P13.1)	83
64	Paysages associés aux plaines alluviales du Seno-Gondo (unités cartographiées P14.2 et P15.2)	83
641	Liés aux plaines alluviales limoneuses ou argileuses . .	84
642	Liés aux glacis de dénudation.	84
65	Paysages associés aux vallées étroites (unités cartographiées P21.2, P21.3, P21.4, P21.5).	85
651	Les galeries de type sahélien ou soudano-sahélien. . . .	85
652	Les galeries forestières soudaniennes et guinéennes. . .	85
66	Paysages associés aux glacis d'épandages (unités cartographiées P31.1, P31.2, P31.3, P31.4, P31.5)	87
661	Domaines sahélien nord et sud	87
662	Domaines soudanien nord et sud	87

663 Domaines soudano-guinéen	88
67 Paysages associés aux zones instables à érosion agressives (unités cartographiées P33.1, P33.2, P33.3).	89
671 Domaine sahélien nord et sud	89
672 Domaine soudanien nord	89
68 Paysages associés aux basses collines cuirassées (unités cartographiées P41.1, P41.2, P41.3, P41.4, P41.5).	89
69 Paysages associés aux basses croupes et glacis carapacés (unités cartographiées P42.1, P42.2, P42.3 et P42.4)	91
610 Paysages associés aux vieilles surfaces d'aplanissement (unités cartographiées P43.3, P43.4, P43.5, P44.4 et P44.5).	92
611 Paysages associés aux bas plateaux ± cuirassés à voile sableux (unité cartographiée P45.1).	93
612 Paysages associés aux reliefs vigoureux (unités cartographiées P51.2, P51.3, P51.4, P51.5, P52.4, P52.5, P53.4)	93
6121 Savanes boisées à forêts claires de versant	94
6122 Systèmes de bowé sommitaux et bowé de versant	95
6123 Formations hygrophiles.	96
6124 Forêts denses sèches.	96
613 Paysages associés aux reliefs gréseux de Bandiagara (unités cartographiées P54.1, P55.1, P56.1).	96
6131 Plateaux, massifs ou buttes à nette influence structurale	97
6132 Modelé collinaire vigoureux	97
6133 Lambeaux de plateaux fossilisés par une cuirasse.	97
614 Paysages associés aux vieux dépôts sableux (unités cartographiées P61.1, P61.2).	98
6141 Les savanes arborées hors des systèmes importants de mare temporaire.	98
6142 Les formations ripicoles des mares temporaires.	98
615 Paysages associés aux systèmes dunaires remaniés ou non (unités cartographiées (P71.1 et P71.2).	99
616 Paysages associés aux paléovallées (unité cartographiée P81.1)	99
617 Paysages associés aux systèmes des plaines alluviales du delta du Niger (unités cartographiées P91.1, P92.1, P93.1, P94.1, P95.1, P96.1, P03.1, P04.1, P05.1 et P06.1).	100
6171 Plaines alluviales anciennes du delta mort.	100
6172 Plaines alluviales inondables du delta vif.	102
6173 Zones exondées du delta	103
Chapitre 7 PRESENTATION DES DONNEES DE L'INVENTAIRE, UTILISATION POTENTIELLE ET CONCLUSIONS	105
71 Cartographie définitive.	107
711 Cartographie provisoire au 1/200 000°.	107

712	Edition définitive au 1/200 000°	107
713	Carte de synthèse au 1/1 000 000	107
72	Présentation des données quantitatives de l'inventaire . . .	109
721	La cartographie.	109
722	Climat	109
723	Population	109
724	Ressources en terres agricoles	111
725	Ressources ligneuses	112
73	Utilisations potentielles des documents produits par l'inventaire	113
731	La forêt et la gestion des ressources ligneuses.	113
732	L'élevage, le sylvo pastoralisme, hydraulique pastorale.	116
733	Statistique agricole	116
734	Vulgarisation agricole, équipement rural	116
735	Génie rural et hydraulique agricole.	116
736	Aménagement du territoire, planification	116
737	Suivi écologique du territoire	117
Annexe : TRAITEMENTS NUMERIQUES DES DONNEES SPOT.		118
SPOT ET FORET		
1	<u>CONTEXTE DE L'ETUDE</u>	119
2	<u>METHODOLOGIE</u>	119
21	Données.	119
22	Matériel informatique.	120
23	Procédure.	120
3	<u>NIENENDOUGOU</u>	120
4	<u>SORONDIAN</u>	124
5	<u>CONCLUSION</u>	129
TELEDETECTION SPATIALE ET INVENTAIRES FORESTIERS		130
1	<u>OBJECTIFS DE CE PROGRAMME DE RECHERCHE</u>	130
2	<u>ETUDE DE LA ZONE DE SORONDIAN</u>	131
21	Trois niveaux d'information.	131
211	Données de terrain	131
212	Photographies aériennes et cartes existantes	131
213	Données SPOT scène n° 040.327.	131
22	Etape essentielle pour un inventaire : la stratification . .	132
23	Analyse visuelle de compositions colorées	132
24	Analyse visuelle de documents améliorés.	135
241	Méthodologie	135

242	Les traitements numériques	135
243	L'interprétation visuelle des compositions	135
25	Classification numérique supervisée.	138
26	Approche quantitative.	140
3	<u>ETUDE DE LA ZONE DE NIENENDOUGOU.</u>	141
31	Données utilisées.	141
32	Classifications numériques	141
33	Segmentations.	141
4	<u>CONCLUSION.</u>	142

*L'illustration reproduite sur la couverture est un extrait de la composition colorée de la scène SPOT 1 HRV 1 35 - 322 du 31 Octobre 1988 (SPOT * PRODUCT. CNES-IGN/DIST. SPOT IMAGE * CNES 1988).*

RESUME

Le Projet d'Inventaire des Ressources Ligneuses du Mali, réalisé conjointement par le CTFT/CIRAD et par les Sociétés BDPA/SCET-AGRI et SYSAME sous la supervision de la DNEF du Mali, a été financé par le Fonds d'Aide et de Coopération de la République française.

Ce projet de développement s'est articulé en deux phases :

- Phase A (1985-1987) : inventaires de zones-tests représentatives des principaux milieux écologiques du Mali.
- Phase B (1988-1991) : extrapolation des résultats obtenus au cours de la phase A à l'ensemble du Mali en utilisant les données SPOT et cartographie sur environ 480 000 km².

La phase A a abouti à la constitution d'une base de données importante sur les formations végétales du Mali et les résultats sont consignés dans deux rapports intitulés :

- Formations végétales (Rapport de Synthèse, première phase)
- Rapport technique

La phase B, basée sur l'exploitation des données satellitaires SPOT (162 images au total), fournit une cartographie des formations végétales et de l'occupation agricole des terres au 1/200 000.

Toutes les données chiffrées sur les ressources forestières et agricoles, sont présentées suivant le découpage administratif du Mali (Régions, Cercles et Arrondissements) dans le rapport "Synthèse Régionale".

Le présent rapport décrit les différentes méthodologies mises au point pour la réalisation de la phase B.

- o - o -

- CTFT/CIRAD : Centre Technique Forestier Tropical - Département du Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement*
- BDPA/SCET-AGRI : Société d'Etude et de Conseil pour l'Aménagement Rural, l'Inventaire et la Gestion des Ressources*
- SYSAME : Société spécialisée en Télédétection et Systèmes d'Informations Géographiques*
- DNEF : Direction Nationale des Eaux et Forêts au Mali*

Chapitre 1

METHODOLOGIE DE L'INVENTAIRE

1 RAPPEL DES OBJECTIFS

Depuis plusieurs années le Mali est confronté à de graves phénomènes de désertification, de dégradation des équilibres écologiques, de diminution des ressources naturelles, tous phénomènes liés à la destruction progressive du couvert ligneux sous l'action de l'homme, des animaux domestiques et des feux, actions destructives aggravées par une phase prolongée de sécheresse.

La croissance démographique et ses exigences en terres agricoles entraînent une évolution rapide de l'espace rural dont la connaissance actualisée est indispensable à l'organisation des actions de développement.

La gravité de la situation a conduit la Direction Nationale des Eaux et Forêts à mettre en oeuvre un projet d'inventaire par télédétection des ressources ligneuses et de l'occupation agricole des terres au Mali.

2 PRESENTATION DU PROJET

21 Financement

Ce projet a été financé par le Fonds d'Aide et de Coopération de la République Française et concerne le Mali et les Etats de l'Afrique de l'Ouest appartenant à la même zone écologique (carte page suivante).

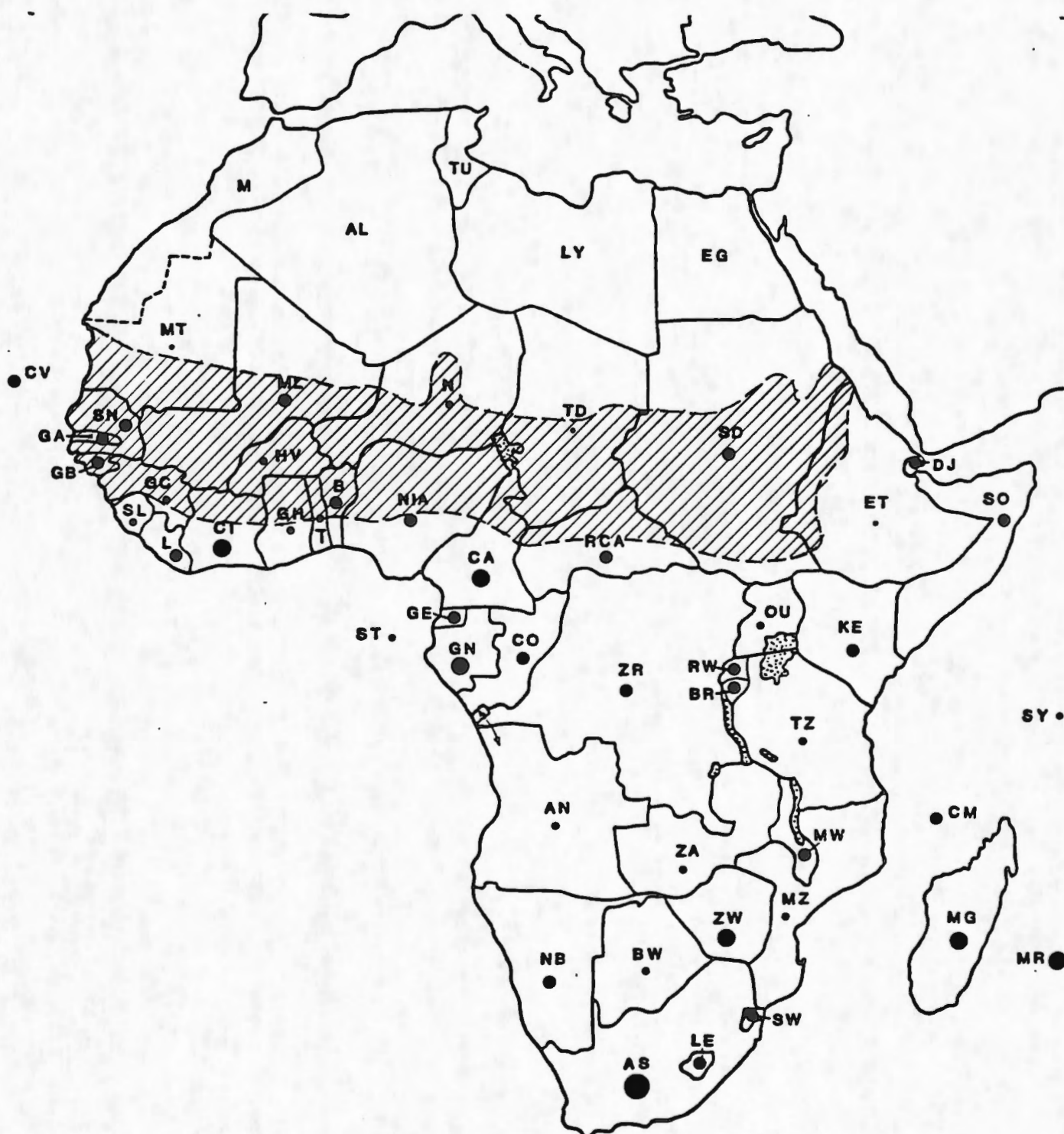
22 Mise en oeuvre du projet et intervenants

La Direction Nationale des Eaux et Forêts au Mali a mis à la disposition le personnel technique nécessaire et assure la supervision institutionnelle du projet.

Le Centre Technique Forestier Tropical département du CIRAD : cet organisme français de recherche a été chargé de la conception des méthodes d'inventaire de terrain, de leur réalisation et du traitement des données.

Les sociétés BDPA-SCET-AGRI, bureau d'études et d'ingénierie du développement et SYSAME, spécialisée en télédétection et systèmes d'information géographique, ont assuré la conception des travaux de télédétection, leur réalisation et la cartographie définitive.

A l'exception de l'édition définitive des cartes la totalité des travaux a été réalisée au Mali.



ECHELLE
1/40 000 000

ZONE ECOLOGIQUE CONCERNEE PAR LES METHODES ET RESULTATS DU PIRL

23 Déroulement du projet

Le Projet a comporté deux phases principales :

Phase A : (1985-1987) qui a eu pour objectifs l'étude détaillée de zones-tests représentatives des principaux milieux écologiques du Mali.

Phase B : (1988-1991) qui a procédé à l'extrapolation des résultats obtenus en phase A et à la cartographie, d'une surface d'environ 480 000 Km² à l'aide de 162 images du satellite SPOT.

24 Localisation géographique

L'inventaire couvre en totalité les 5 régions administratives de l'ouest et le centre du Mali ainsi que les zones habitées riveraines du fleuve Niger. Ce territoire intéresse directement plus de 75% de la population malienne et l'essentiel de l'espace d'utilisation agro-sylvo pastorale du Pays.

3 METHODOLOGIE ET ACQUIS DE LA PHASE A

Les étapes de la mise en oeuvre de cette phase ont été les suivantes :

31 Stratification préliminaire de la végétation du Mali : à partir de la synthèse des documents existants, réalisation d'une carte au 1,5 millionième définissant des zones éco-floristiques homogènes en fonction des différentes zones bioclimatiques et des principaux types de milieu physique qui conditionnent la nature et la distribution des formations ligneuses au Mali.

32 Sélection de 16 zones-tests représentatives des zones éco-floristiques homogènes couvrant environ 40 000 ha chacune.

33 Sur chacune des zones-tests. photointerprétation et cartographie détaillée au 1/50 000 des formations végétales et des unités morphopédologiques associées. Cette cartographie est utilisée comme stratification pour l'implantation d'un sondage à deux degrés. (240 unités primaires sondées à un taux de 5%).

34 Inventaire de terrain : comportant l'identification de toutes les essences ligneuses de hauteur supérieure à 1m recensées par espèce et par classe de taille. Le traitement informatisé des données de comptage fournit l'ensemble des données d'inventaire forestier classique.

S'y ajoute des informations concernant la mortalité des arbres qui ont permis l'évaluation de l'impact des sécheresses récentes.

Les principaux acquis de cette phase sont les suivants :

a) pour la suite du projet, l'accumulation de données précises de référence portant sur les 600 000 ha de zones-tests étudiés au 1/50 000.

b) pour la connaissance des formations végétales de l'Afrique tropicale, un rapport établissant une synthèse écologique des résultats de l'inventaire.

c) pour la réalisation des inventaires forestiers en formations tropicales sèches, la mise au point de techniques de terrain et de logiciels de traitement de données adaptés à ces types de formation.

4 METHODOLOGIE ET ACQUIS DE LA PHASE B

41 Acquisition des images du satellite SPOT

Au total 162 images acquises entre 1987 et 1989, ont été exploitées dans le cadre de cet inventaire.

La distinction entre la végétation ligneuse et la végétation herbacée impose une date d'enregistrement en saison sèche, époque où la strate herbacée ne donne pas de réponses spectrales en zone sèche.

Les images ont donc été acquises en saison sèche (Octobre-Mars) par programmation et/ou sur catalogue.

42 Exploitation de l'imagerie du satellite SPOT

Deux contraintes principales affectent l'exploitation de l'imagerie satellite en Afrique de l'ouest pour la cartographie par télédétection des ressources ligneuses :

a) la fréquence des feux de brousse qui affectent, sur de superficies variables, les réponses spectrales des deux tiers des 162 images acquises.

b) la faible densité de la végétation ligneuse difficilement identifiable malgré le pouvoir de résolution de SPOT en multispectral (20m x 20m).

En revanche la haute définition de SPOT permet une interprétation raisonnée des séquences de milieu naturel qui sont déterminantes pour la distribution de la végétation ligneuse (ce qui avait été confirmé, par les travaux de la phase A).

Pour toutes ces raisons et pour des raisons d'économie d'un chantier de traitement de 162 images réalisé à Bamako, l'exploitation de l'imagerie satellite a été réalisée en mode visuel (analogique) par délimitation d'unités morphopédologiques caractérisées par les formations végétales qui leur sont habituellement associées.

Le matériel utilisé est un film au 1/200 000 d'une composition colorée multispectrale sur lequel sont délimitées :

- les zones d'occupation agricole des terres
- les limites des unités morphopédologiques, base de la distribution des formations végétales

- les réponses spectrales spécifiques de la végétation ligneuse lorsqu'elles sont significatives et interprétables.

Ce travail nécessite une très solide expérience des zones à étudier.

Parallèlement à l'inventaire, deux études test ont toutefois été entreprises pour expérimenter les possibilités d'amélioration d'images et de traitement numérique (cf. Annexe Traitement numérique des données SPOT).

43 Contrôles de terrain et sondages complémentaires

L'interprétation préliminaire de l'image SPOT est utilisée comme base de stratification pour le choix des 1580 sondages de terrain réalisés par placettes. Ceux-ci constituent un complément quantitatif des données acquises en phase A et fournissent l'opportunité de tester les réponses spectrales de l'image à partir de la vision du terrain.

44 Cartographie définitive

Celle-ci a été réalisée au 1/200 000 et a donné lieu à la publication de deux cartes :

a) une carte des formations végétales dont chaque unité est affectée d'un contenu en ressources ligneuses estimé à partir des données de terrain.

b) une carte d'occupation agricole des terres qui délimite les principaux systèmes d'occupation agricole des terres et leurs jachères associées. Ce document fournit, en outre, l'extension possible des systèmes pratiques sur la base des contraintes morphopédologique affectant les terres.

L'édition de ces cartes en offset couleur par scannerisation des maquettes colorisées a été achevée au début de 1991.

Les cartes sont présentées en 26 coupures pour chacun des deux thèmes et imprimées en 200 exemplaires. Une carte de synthèse pour chaque thème au 1/1 000 000 couvre l'essentiel de la zone inventoriée.

45 Présentations des données de l'inventaire

Les surfaces des formations ligneuses calculées d'après les cartes et les volumes estimés au cours de l'inventaire sont présentés suivant le découpage administratif des Cercles et de leur Arrondissements.

Cette présentation est destinée à faciliter l'utilisation de l'inventaire à des fins de développement régional.

Les données de l'inventaire corrélées à celles du recensement de 1986 permettent une bonne appréciation du niveau relatif de la pression humaine sur les ressources dans chaque arrondissement.

Pendant toute la durée du projet les données de l'inventaire ont été présentées en documents provisoires sous la forme de Notices de Cercle et livrés au fur et à mesure.

Ces documents ont été utilisés en cours de projet par de nombreux organismes du développement.

L'édition finale comprend :

- a) une synthèse technique, objet du présent rapport
- b) une synthèse régionale réunissant toutes les données chiffrées et établissant un diagnostic sur les ressources en reprenant en partie l'essentiel du contenu des Notices de Cercle qui ont été éditées en document de travail au fur et à mesure du déroulement du projet.

5 CONCLUSIONS

La méthodologie de cet inventaire a été conçue au début des années de la décennie 1980, c'est-à-dire avant le lancement du satellite SPOT et avant le développement des méthodes d'exploitation des données satellitaires et des systèmes d'information géographique. L'objectif prioritaire d'une réalisation de la presque totalité des travaux au Mali excluait l'utilisation de procédures et d'équipements insuffisamment rodés et comportant des exigences élevées en maintenance et en appui. En 1990 un inventaire du même type serait à concevoir avec une méthodologie sensiblement différente.

Il n'en demeure pas moins que cette opération a permis de cartographier au 1/200 000, de façon homogène, la majeure partie de l'espace agricole utile du Mali avec des documents (cartes et données chiffrées) qui concernent à la fois le développement régional et la conservation des ressources naturelles renouvelables.

Chapitre 2

TELEDETECTION

1 METHODOLOGIE D'EXPLOITATION DES IMAGES SATELLITES

11 Les raisons du choix de l'interprétation visuelle (ou analogique)

A l'exception de deux opérations de recherche (résultats en annexe) la totalité du travail d'exploitation des images satellites a été réalisée par interprétation visuelle.

Ce choix repose sur les principaux facteurs de décisions suivants :

Facteurs historiques : La conception du projet et la programmation de son budget ont été réalisés avant le lancement du satellite SPOT en 1984.

L'utilisation de matériel de traitement numérique d'images, très coûteux à l'époque, ainsi que la complexité des logiciels existants rendaient hasardeux compte tenu également des problèmes de maintenance l'organisation d'un chantier de traitement numérique sur près de 160 scènes SPOT à traiter.

Facteurs liés à l'écologie locale des formations ligneuses

Deux contraintes importantes avaient pu être mises en évidence sur la base de la connaissance générale des formations ligneuses du Mali :

- . La distribution et la faible densité des ligneux qui limitent fortement les réponses spectrales de la végétation ligneuse sur une large partie de la zone d'inventaire.
- . La difficulté d'interprétation due à la présence de nombreux feux de brousse.

Facteurs financiers

L'achat de 160 bandes magnétiques et d'un matériel de traitement numérique étaient inenvisageables pour le budget du Projet.

Facteurs techniques

L'équipe chargée de l'exploitation de l'imagerie satellite avait une solide expérience de la zone d'inventaire ce qui permettait de procéder à interprétation visuelle relativement fiable (et surtout constante dans les délais de production de documents qui devaient être utilisés comme base de travail pour les inventaires de terrain).

Si les contraintes écologiques n'ont pas changées en 1991 les autres facteurs ont évolué et il est certain que pour un inventaire similaire l'utilisation du traitement numérique pourrait être envisagé pour procéder à des améliorations d'images ou à différentes méthodes de classification des formations végétales.

12 Supports utilisés

Les reproductions d'images

Les images SPOT ont été livrées par la société SPOT IMAGE sous la forme de films de compositions colorées multispectrales de niveau 1B à l'échelle de 1/400 000°.

A partir de ces films ont été réalisés des documents agrandis au 1/200 000° :

- un film transparent et un contact papier destiné au travail de bureau à Bamako, dans un local climatisé,
- un contact papier plastifié nécessaire aux contrôles de terrain.

Choix de l'échelle

Le 1/200 000° a été retenu afin de faciliter la cartographie finale prévue à cette échelle.

Ce choix a permis des gains de temps et de précision considérables lors du report de l'interprétation sur les fonds de cartes IGN. A cette échelle et à la latitude du Mali les images SPOT (compositions colorées niveau 1B) sont pratiquement superposables au fond IGN, avec des décalages inférieurs à 3mm pour l'ensemble d'une scène.

Le 1/100 000° n'a pas été retenu pour les raisons suivantes :

- coûts supplémentaires des copies couleurs issues du film 1/400 000°,
- coût résultant des temps de dessin d'interprétation multiplié par quatre par rapport au travail directement exécuté au 1/200 000°,
- coût et difficultés d'effectuer des réductions au 1/200 000° d'une interprétation réalisée au 1/100 000° lors de la phase finale de cartographie prévue à cette échelle et réalisée à Bamako.

13 Méthode d'exploitation des images SPOT

Les films au 1/200 000° des images SPOT ont été interprétés sur table lumineuse avec l'aide d'une loupe.

L'interprétation est réalisée sur un support stable transparent habituellement utilisé en photo-interprétation, le dessin étant exécuté à l'aide d'un stylo-mine (mine noire de 0,4mm) pouvant être facilement effacé et corrigé si nécessaire.

Bien que moins transparent que les supports type acétate, le support utilisé permet un dessin au crayon d'une plus grande finesse que celui nécessairement réalisé à l'encre sur acétate (avec les problèmes de séchage rapide de l'encre à Bamako). Le travail sur film et table lumineuse à compensé largement cette plus faible transparence du support utilisé.

Les principales étapes de l'exploitation des images SPOT ont été les suivantes :

- interprétation préliminaire
- contrôles de terrain
- interprétation définitive
- report de l'interprétation sur fond topographique.

14 Interprétation préliminaire

Habillage du calque d'interprétation

Cette opération comporte le tracé d'un réseau hydrographique simplifié, des principales voies de communication et agglomérations. Le travail est réalisé avec comme guide un film de la carte IGN au 1/200 000°. Cette confrontation permet en outre une actualisation du fond qui sera utilisée pour l'édition définitive (routes nouvelles détectables sur l'image).

L'ensemble de cette habillage est destiné à :

a) Fournir des éléments repérables pour les contrôles de terrain qui seront exécutés avec comme base la carte issus de l'interprétation préliminaire.

b) Faciliter et améliorer les opérations de report de l'interprétation sur le fond topographique utilisé pour la cartographie définitive.

Délimitation des unités morphopédologiques

Cette délimitation constitue le premier niveau de statification de l'inventaire et les raisons de ce choix seront explicitées dans le paragraphe 23 de ce rapport.

A partir de la légende de base qui liste les unités morphopédologiques, retenues le travail est réalisé avec comme guide l'interprétation des indicateurs géomorphologiques fournis par le film de la carte IGN superposé à l'image.

L'interprétation des réponses spectrales visibles sur l'image complète cette approche et débouche sur la reconnaissance et la délimitation d'unités de paysage morphopédologique : zones alluviales, zones d'inondation, glacis, cuirasses affleurantes, différentes formes d'accumulation sableuse, etc... Les critères de reconnaissance sont variés et tiennent à la fois aux réponses spectrales (sols, végétation hydrographie, occupation des sols) et aux structures de distribution de ces éléments (formes alluviales, formes dunaires, séquences ordonnées de collines cuirassées et de glacis alluviaux qui les séparent).

La fiabilité de ce travail d'interprétation suppose au préalable une solide expérience du milieu à interpréter. Le début des travaux de télédétection a dû être fortement étayé par les études morphopédologiques existantes (IRAT) et par les cartes des 16 zones-tests de la première phase de l'inventaire.

Identification et sélection des réponses spectrales propres à la végétation ligneuse

Cet aspect de l'interprétation préliminaire sera développée dans le paragraphe 25 de ce rapport.

Succinctement on retiendra que cette détection n'a apporté d'informations fiables, c'est-à-dire cartographiables à partir de clefs d'interprétation normalisées, que dans un nombre limité de cas :

- présence de végétation ligneuse suffisamment dense et en pleine activité végétative pour fournir des réponses spectrales significatives.
- absence de végétation herbacée en activité végétative susceptible d'influencer les réponses spectrales.
- absence de feux de brousse ceux-ci rendant pratiquement impossible toute interprétation sur les formations végétales qui ont été affectées.

Sortie d'une carte préliminaire

Le document est issu directement de l'interprétation et présenté sur tirage ozalid colorié. Il identifie les zones prioritaires dont le contenu doit être précisé sur le terrain et permet le tracé des itinéraires de contrôle et des points d'inventaires forestiers complémentaires.

Révision de l'interprétation préliminaire

Cette révision s'appuie sur les informations issues du contrôle de terrain. Elle permet la caractérisation des zones posant des problèmes d'identification en phase préliminaire, et des corrections éventuelles d'erreurs d'interprétation.

Cette révision s'est souvent accompagnée d'un travail sur image destinée à une cartographie limitée à des zones test représentatives. L'objectif étant d'obtenir des données de pourcentage d'unité non délimitées sur la cartographie définitive du 1/200 000° en raison de leur taille mais constituant des éléments contrastés et composant les paysages qui les regroupent.

(Exemple : proportions des cuirasses dénudées, des savanes boisées et des galeries forestières distribuées en mosaïque et rassemblées sur la carte au 1/200 000° en une seule et même unité).

15 Choix de la période optimum d'acquisition d'images SPOT pour la cartographie des formations ligneuses

151 Antécédents

En août 1986, lors du lancement de la programmation des enregistrements satellitaires nécessaires à l'inventaire, on ne disposait que de peu d'informations et d'expérience relatives à la détermination de la période optimale d'acquisition d'images pour la télédétection de la végétation ligneuse dans la zone bioclimatique considérée (zone comprise entre les isohyètes 200 à 1 600 mm).

En préalable, une approche avait toutefois été tentée comportant l'interprétation de deux scènes LANDSAT acquises en fin de saison des pluies.

- Composition colorée (canaux 4, 5, 7) du 5 septembre 1984 pour la zone sahélienne nord, isohyètes 400 et 700 mm.
- Composition colorée (canaux 4, 5, 7) du 16 octobre 1984 pour la zone soudanienne, isohyètes 900 et 1100 mm.

Chacune de ces deux scènes étaient couverte par une zone d'étude cartographiée, inventoriée sur le terrain (zone test de Nara : 40 000 ha et de Sousan : 38 000 ha).

On retiendra comme conclusion principale que les images LANDSAT prises à cette période ne permettent pas une discrimination suffisante entre la végétation herbacée et la végétation ligneuse, toutes deux encore en activité chlorophyllienne malgré la saison des pluies relativement déficitaire en 1984 et donnant des réponses spectrales peu contrastées sur composition colorée.

152 Objectif de ce projet

La végétation ligneuse constituait, à l'origine du projet, l'objectif principal des travaux de télédétection.

Il est toutefois apparu évident que moyennant un surcoût très modeste une cartographie de l'occupation agricole des terres pouvait être conduite simultanément avec celle de la végétation naturelle.

Ce deuxième objectif était donc à prendre en compte pour la sélection des dates d'enregistrement des images satellitaires à utiliser.

Caractéristiques de la végétation ligneuse

Les formations végétales à étudier se composent pour l'essentiel de steppes et de savanes sahélo-soudanaises dont les composantes arbustives ou arborées sont en densité variable (influence bioclimatique, édaphique, importance des défrichements agricoles), mais presque toujours mélangées à une végétation herbacée.

La télédétection de la partie ligneuse de ces formations végétales nécessite donc l'absence de réponses spectrales des espèces herbacées presque toujours en proportion élevée sur toute la zone concernée par l'inventaire.

Sauf exceptions rares (galeries forestières), les essences caducifoliées, semi-caducifoliées et sempervirentes sont en mélange en proportion variable.

Enfin les essences grégaires sont rares sauf dans certaines régions sud du Mali (*Isorberlinia doka*, *Uacapa Togoensis*).

On notera des cycles phénologiques relativement différenciés pour certaines essences et groupes d'essences caducifoliées :

- dessèchement et perte des feuilles plus ou moins rapides et complets à partir du début de la saison sèche,
- apparition des feuilles nouvelles à dates variables (avant la saison des pluies ou après seulement les premières pluies efficaces),
- perte des feuilles en saison des pluies (cas rare de l'*Acacia albida*),
- impact des feux de brousse sur le feuillage des ligneux.

D'une façon générale, la période qui précède la saison des pluies (mai à juin) serait en théorie la plus favorable, la plupart des essences ligneuses étant en "feuille" à cette période et la strate herbacée "dormante" ou absente.

Malheureusement, la programmation d'une acquisition d'images est beaucoup trop risquée car dès qu'une pluie efficace survient, l'ensemble de la végétation herbacée entre en activité en moins de trois jours et la discrimination entre ligneux et végétation herbacée s'avère pratiquement impossible (cf. page suivante reproduction de la scène KJ 43-329 du 6 mai 1986).

Caractéristiques des systèmes d'utilisation agricole des terres

Le système dominant est la culture en sec traditionnelle : mil, sorgho, localement arachide au Nord de l'isohyète 900 mm, sorgho localement maïs et coton au Sud de cet isohyète avec riziculture pluviale de nappe dans les bas-fonds.

La maturation et l'enlèvement des récoltes s'échelonnent en moyenne de la fin octobre au 15 décembre suivant les cultures et les régions.

Dans ce créneau de date, les zones cultivées dans l'année donnent une réponse spectrale proche de celle des sols nus qui se distinguent des jachères récentes ou des jachères plus anciennes. Cette période est donc relativement favorable à une cartographie de l'occupation agricole des terres.

153 Contraintes liées aux conditions météorologiques

a) Contraintes résultant de l'harmattan

Ce vent qui peut souffler en saison sèche de fin janvier à mai affecte prioritairement la partie sahélienne à étudier mais peut couvrir l'ensemble du Mali certaines années.

Ce vent chargé de poussières provoque une "brume sèche" qui diminue fortement les possibilités de télédétection dans les canaux utilisés pour l'étude de la végétation.

La date d'apparition de ce vent, sa durée, les régions concernées ne sont pas prévisibles longtemps à l'avance dans les conditions actuelles.

b) Contraintes liées à la couverture nuageuse

Ces contraintes se manifestent évidemment pendant la durée de la saison des pluies, de mai à octobre, mais aussi en fin de saison des pluies avec des risques non négligeables pour le Sud du Mali jusqu'au 15 décembre.

Des enregistrements de qualité ont pu être obtenus pendant cette période mais la contrainte se manifeste dès qu'une programmation doit intéresser une vaste surface.

Enfin on notera en octobre-novembre 1987 un voile nuageux qui a couvert la zone sahélienne pendant une longue période et qui n'a permis l'obtention que d'un nombre limité d'images.

154 Contraintes liées aux feux de brousse

Cette contrainte doit être considérée comme l'une des plus importantes pour les raisons suivantes :

a) Elle altère considérablement les réponses spectrales et exclut totalement toute interprétation automatisée des enregistrements. Cette altération reste sensible pour tous les canaux d'enregistrement actuellement utilisés que ce soit par SPOT ou par LANDSAT MSS ou TM. Elle concerne toute l'information issue des réponses spectrales du sol et de la végétation qui apparaissent sur des compositions colorées avec une teinte noire plus ou moins soutenue suivant l'ancienneté des feux. A cette contrainte peut s'ajouter le voile plus ou moins épais et étendu, constitué par la fumée des feux en cours de propagation au moment de l'enregistrement.

b) Quelle que soit l'extension des zones affectées par les feux de brousse, cette altération ne constitue pas, à l'heure actuelle, une raison suffisante permettant de refuser la livraison d'images dont la programmation a été commandée (comme c'est le cas pour la présence de nuages).

FEUX DE BROUSSE

KJ 34-324 28/11/87 REGION DE KENIEBA (soudano-guinéen)



PLATEAU CUIRASSE (Bowal)
à très faible réserve en eau du sol

A droite :
Végétation arborée
desséchée

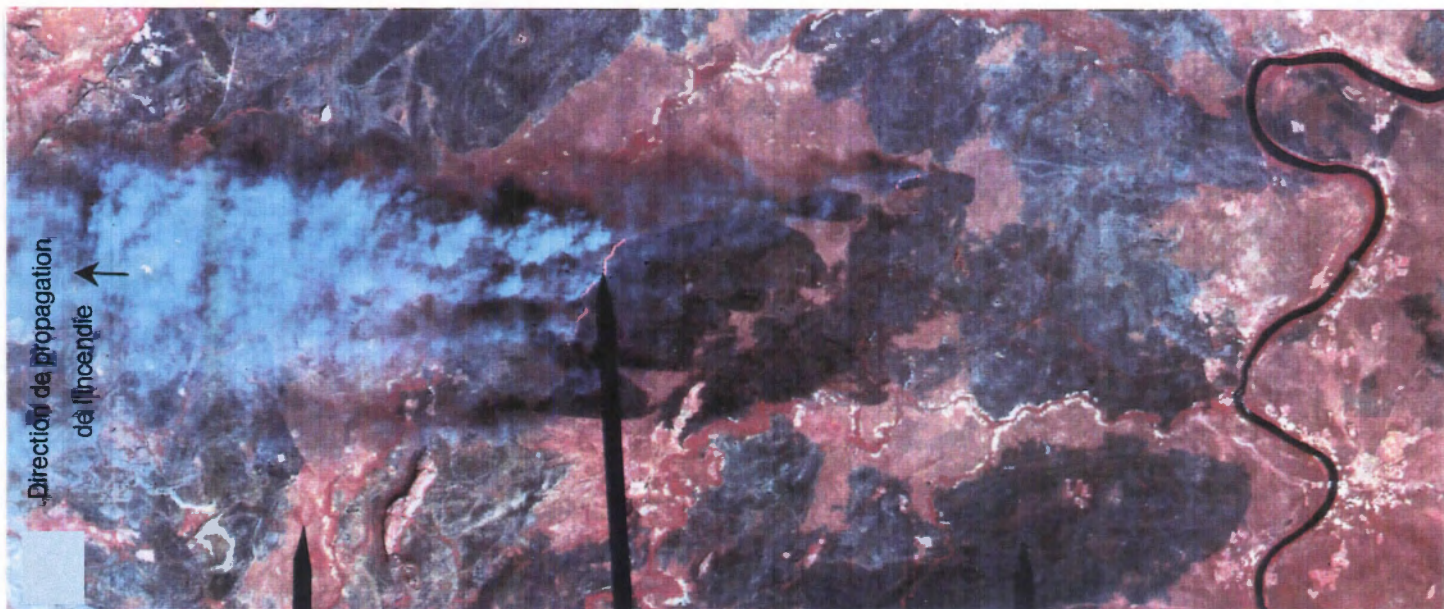
A gauche :
Même type de
végétation incendiée

en rouge vif :
végétation ligneuse dense

SAVANE BOISEE A FORET CLAIRE
SUR GLACIS, à bonne réserve en eau,
encore peu combustible à cette
période de l'année

Feu assez récent
sur colline cuirassée
(milieu très sec)

KJ 34-323 28/11/87 ENTRE KENIEBA ET BAFLOULABE (soudanien sud)



Direction de propagation
de l'incendie

Front de l'incendie
et fumées de combustion

Bafing

Zone non encore incendiée,
glacis d'épandage.
Sols à bonne réserve en eau,
avec végétation en activité et peu combustible
à la date de l'image

Zone incendiée sur collines et glacis cuirassé,
sols à faible réserve en eau et végétation
herbacée sèche et combustible
à cette date

c) La période de déclenchement et de propagation des feux de brousse suit de très près celle correspondant à la période favorable à la discrimination entre ligneux et végétation herbacée en voie de dessèchement. Sur une même image les zones affectées par les premiers feux correspondent aux sites aux plus faibles réserves en eau, alors que sur les sites les plus humides, la végétation herbacée peut rester encore en activité végétative et se trouver difficilement discriminable des ligneux.

d) La prévision de la période précise le déclenchement et l'extension des feux est pratiquement impossible. Elle dépend d'une série de facteurs comme :

- la date de fin des dernières pluies, variable suivant les années climatiques,
- le plus ou moins grand respect des consignes officielles transmises aux ruraux de ne pas déclencher ces feux de brousse,
- des facteurs plus ou moins aléatoires comme la présence de vent au moment où les feux habituellement se produisent ; ces vents accélérant la propagation des feux sur de vastes surfaces qui n'auraient été que partiellement brûlées en l'absence de vent.

e) Le tableau suivant présente un bilan des contraintes liées aux feux de brousse.

**CADRE POUR LA SELECTION DE LA PERIODE FAVORABLE A L'ACQUISITION
D'IMAGES SPOT POUR LA TELEDETECTION DE LA VEGETATION LIGNEUSE
AU MALI ET L'OCCUPATION AGRICOLE DES TERRES**

PERIODE		Contraintes	Facteurs favorables
Nord isohyète 900 mm	Sud isohyète 900 mm		
1 nov. au 15 juin	15 déc. au 1 mai	<ul style="list-style-type: none"> - Risques élevés de feux de brousse en particulier Sud isohyète 900 mm - Risque d'Harmattan - Perte du feuillage des ligneux caducifoliés 	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne vision des formations ligneuses sempervirentes et des galeries forestières - Période parfois favorable jusqu'au 15 janvier (Sud isohyète 900 mm) sous réserve de l'extension des feux de brousse
15 juin au 15 juil.	1 mai au 1 juil.	<ul style="list-style-type: none"> - Discrimination difficile entre végétation ligneuse et herbacée en cas de pluies efficaces précoces et imprévisibles 	<ul style="list-style-type: none"> - Activité chlorophyllienne croissante à l'approche de la saison des pluies pour la plupart des ligneux - Période à tester sur images déjà enregistrées
15 juil. au 1 oct.	1 juil. au 15 nov.	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvaise discrimination entre végétation ligneuse et herbacée - Risque d'ennuagement 	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne discrimination entre végétation herbacée et ligneuse en fin de période et sur les sols à faible rétention en eau - Période à tester sur image déjà enregistrée en fin de période
1 oct. au 1 nov.	15 nov. au 15 déc.	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilité d'apparition de feux de brousse variable suivant années climatiques et aléas non prévisibles - Discrimination parfois délicate en zone de bas-fonds entre végétation herbacée et ligneuse - Risque prolongation de la saison des pluies au Sud isohyète 900 mm (dans le cas d'un enregistrement programmé à l'avance) et de nuages - Risque de perte de feuillage des caducifoliés (risque croissant en particulier en année à pluviosité déficitaire) 	<ul style="list-style-type: none"> - Période considérée comme la plus favorable malgré un risque déjà élevé de feux de brousse - Végétation ligneuse encore en activité chlorophyllienne pour la majeure partie des espèces - Végétation herbacée desséchée ou en voie de dessèchement avec de faibles réponses spectrales hors zones humides

155 Conclusions

Il en résulte que la période d'enregistrement optimum pour la discrimination de la végétation ligneuse au Mali par télédétection satellitaire est assez brève, de l'ordre du mois. Même en cas d'obtention d'images, l'utilisateur ne se trouve pas à l'abri d'aléas difficilement prévisibles comme la plus ou moins grande extension de feux de brousse.

Toutes ces raisons ont rapidement limité l'intérêt d'une demande de programmation (avec le surcoût qu'elle implique). Au fur et à mesure de l'avancement du projet il est apparu plus intéressant d'acheter des images déjà enregistrées et choisies sur catalogue en fonction de leur date d'enregistrement mais surtout de la rareté des altérations de l'image SPOT dues aux feux de brousse (examen des quick look).

Le tableau qui suit résume les contraintes et facteurs favorables de trois larges périodes d'enregistrement pour les deux zones bioclimatiques considérées.

2 TELEDETECTION ET APPROCHE MORPHOPEDOLOGIQUE DU MILIEU NATUREL

21 Objectifs

211 Les besoins de l'inventaire des ressources ligneuses

Cet inventaire nécessitait une stratification préalable de l'espace boisé sur des critères constants applicables à l'ensemble de la zone à inventorier.

En effet, une cartographie fondée directement sur la télédétection du couvert végétal ligneux n'était pas applicable pour les raisons déjà évoquées :

- faible densité du couvert ligneux sur la plus large partie de la zone d'inventaire laissant peu d'espoir d'obtention de réponses spectrales significatives sur l'image satellite
- mode de distribution des ligneux très variable en fonction des différentes catégories de savane arbustive, savane arborée et savane boisée.
- variabilité des réponses spectrales des images SPOT utilisées résultant à la fois de facteurs non modifiables (densité de la végétation) ou difficilement prévisibles (présence des feux de brousse perturbant fortement des réponses spectrales).

En revanche les études réalisées pendant la première phase de ce projet (cartographie au 1/50 000 de la morphopédologie et de la végétation, inventaire forestier) avaient confirmé les relations étroites entre les modes de distribution de la végétation ligneuse et le contexte morphopédologique (sols, régime hydrique) replacé dans son domaine bioclimatique.

Pour les deux raisons évoqués précédemment, c'est donc une approche de type morphopédologique qui a été mise en oeuvre pour réaliser la stratification de premier niveau de l'ensemble de la zone d'inventaire. En deuxième étape le découpage de l'espace a servi de référence à une interprétation raisonnée des réponses spectrales pouvant être attribuée ou non à la végétation ligneuse.

212 Les besoins de la cartographie de l'occupation agricole des terres

L'approche morphopédologique a permis de replacer les principaux systèmes d'occupation agricole des terres identifiables sur les images satellites dans leur contexte de contraintes et potentialités des ressources en sols utilisés. Ces observations permettent en particulier d'établir des prévisions futures d'occupation agricole des terres et des estimations de réserve en terres appartenant à des ensembles morphopédologiques encore peu exploités pour des raisons historiques de peuplement.

Ce point de vue sera développé dans le paragraphe 53 du chapitre concernant la télédétection et la cartographie de l'occupation agricole des terres.

22 Mise en oeuvre de l'approche morphopédologique

221 Concepts utilisés

L'unité morphopédologique et les séquences de végétation qui lui sont associées prend en compte des facteurs dynamiques (érosion, sédimentation, régime hydrique, altération des roches, etc...). Ces facteurs concourent à la genèse des formes du relief et à l'évolution des sols dont les caractéristiques sont précisées sur le terrain (texture, roche mère, régime hydrique, etc...).

La délimitation des unités morphopédologiques utilisées comme stratification de l'espace dans le cadre de cet inventaire a reposé sur les sources d'information suivante :

- les documents existants sur le sujet au Mali (Etudes IRAT, Atlas PIRT)
- les résultats de la première phase de l'inventaire (1985-1987) qui ont mis en évidence des relations assez fidèles entre la végétation ligneuse et la morphopédologie, l'ensemble étant replacé dans un contexte bioclimatique donné
- les informations et indices fournis par les cartes topographiques IGN au 1/200 000^e (courbes de niveau, structure du réseau hydrographique, falaise du rapture de cuirasse ferrugineuse, etc...) (c.f. : Rapport de synthèse I).
- les potentialités offertes par l'exploitation de l'image satellite mais aussi ses limites, les moyens du projet n'ayant permis l'acquisition de photographies aériennes permettant la vision du relief que sur environ 15% de la superficie.

La synthèse de l'ensemble de ces données a débouché sur la constitution d'une liste d'unités morphopédologiques qui répondent aux critères suivants :

- être délimitables de façon systématique sur les images satellites et avec des informations complémentaires dont on pouvait disposer
- être significatives sur le plan de la distribution et des probabilité de présence des différentes formations végétales que l'on se proposait d'inventorier.

Il reste évident que la "logique" de la distribution des formations ligneuses en fonction du contexte morphopédologique est susceptible de modifications locales importantes résultant :

- du contexte bioclimatique
- de l'historique de peuplement floristique
- de l'impact des dégradations plus ou moins fortes liées à la sécheresse et/ou à l'action de l'homme.

Ce constat marque les limites de l'approche morphopédologique pour la cartographie de la végétation ligneuse donc l'inventaire a du être complété par un dispositif de sondage de terrain qui sera exposé dans le chapitre 4.

Les tableaux qui suivent décrivent les unités morphopédologiques utilisées dans le cadre de l'inventaire et séparent les unités utilisées sur l'ensemble du Mali de celles qui sont spécifiques à certaines régions comme :

- Hodj est et Akle Azaouad
- Delta du Niger
- Zone lacustre
- Gourma
- Plateau de Bandiagara
- Seno Gondon
- Boucle du Niger

Ces tableaux comportent en final 3 colonnes avec les indications suivantes :

- UM : unité morphopédologique avec le numéro d'identification sur les cartes
- UA : utilisation agricole traditionnelle de l'unité morphopédologique caractérisée par l'échelle suivante :

0 utilisation très rare
 + utilisation rare
 ++ utilisation variable
 +++ utilisation fréquente
 ++++ utilisation très fréquente

- UP : utilisation agricole potentielle classée par les quatre indicateurs suivants qui sont valables sous réserve du contexte climatique local :

I : en majeure partie apte à l'utilisation agricole avec les systèmes agricoles actuellement pratiqués et leur temps de jachère nécessaire. Pour cette catégorie les surfaces correspondantes ont été retenues pour l'évaluation des réserves en terres agricoles associées aux zones incultes.

II : partiellement apte ou apte sous certaines conditions avec des temps de jachère nécessaires supérieurs à la normale.

III : partiellement apte sous réserve de possibilité de contrôle de l'eau.

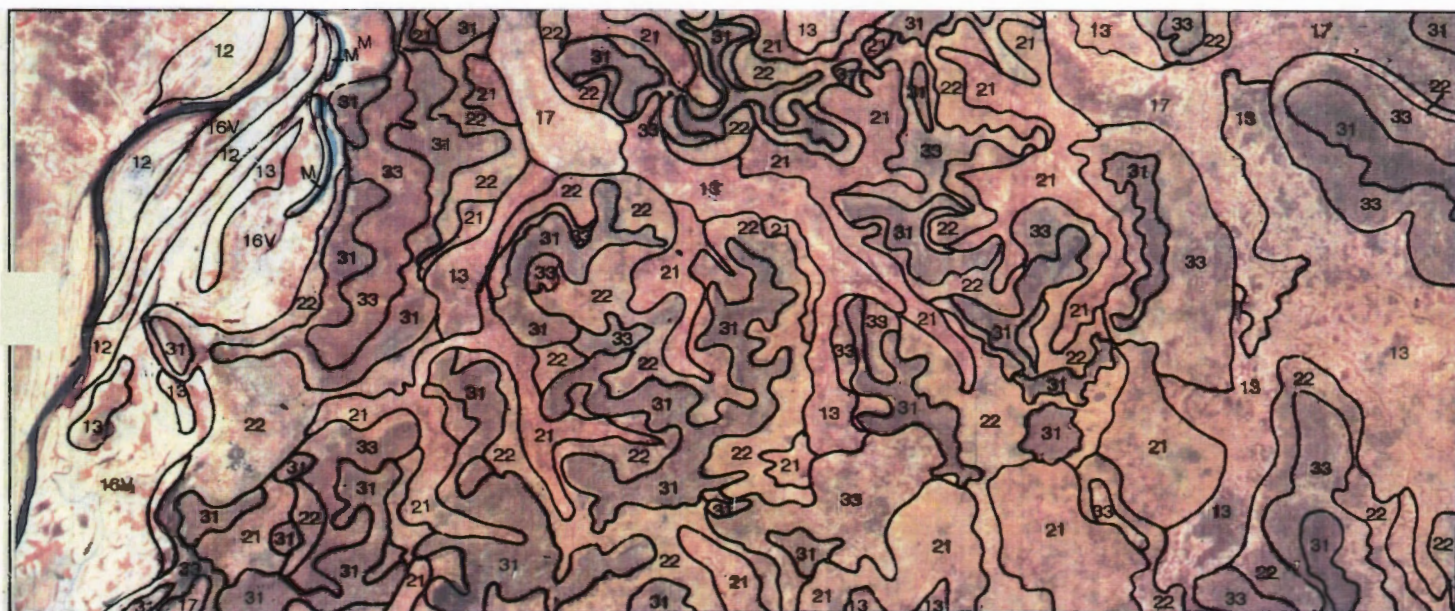
IV : en majeure partie inapte à l'utilisation agricole.

23 Cartographie morphopédologique. Légende générale des cartes

UNITES MORPHOPÉDOLOGIQUES		TOPOGRAPHIE	MATÉRIAUX	UM	UA	UP
FORMES D'ACCUMULATION	DEPOTS ALLUVIAUX RECENTS	Délaissé de rivière, banc médian ou latéral. Inondation périodique.	Migration de matériaux grossiers : galet, gravier, sable.	11	0	IV
		Chenal longitudinal. Inondation périodique.	Profondeur: $\geq 1m$. Apport alluvial. Texture fine dans les chenaux, grossière sur les bourrelets. Hydromorphie par inondation.	12	+	III
		Plaine alluviale, localement présence de micro reliefs. Inondation exceptionnelle.	Profondeur: $\geq 1m$. Apport alluvial. Texture fine à moyenne. Hydromorphie locale.	13	++	III
		Vallée étroite et sinueuse. Inondation périodique variable selon la topographie.	Profondeur: 0.40 à 0.80m. Apport alluvio-colluvial. Texture fine, localement recouvrement sableux.	14	+++	I
		Basse plaine engorgée en hivernage. Inondation périodique.	Profondeur: $\geq 1m$. Texture fine sur l'ensemble du profil. Hydromorphie par inondation et par remontée de la nappe.	15	+	III
		Basse plaine à engorgement prolongé. Chenal divaguant. Inondation périodique sévère.		16	0	III
	DEPOTS ALLUVIAUX ANCIENS	Plaine dépressionnaire avec cuvettes de décantation sans vidange possible.	Profondeur: 0.50 à 0.80m. Apport alluvio-colluvial. Texture généralement fine avec drainage déficient.	17	+	III
		Bourrelet de berge. Important dépôt alluvial édifié par les crues. Localement formation de chenaux.	Profondeur: $\geq 1.20m$. Texture sableuse sur les bourrelets, lourde et hydromorphe dans les chenaux.	18	+	II
	GLACIS D'EPANDAGE	Plaine, pente de 2 à 6 ‰, présence d'une nappe phréatique.	Profondeur: 0.50 à 0.80m. Apport alluvio-colluvial. Texture limono-sableuse. Sol anthropique.	21	++++	I
		Plaine, pente de 2 à 6 ‰, présence d'affleurements gréseux et de cuirasses de bas de pente.	Profondeur variable: 0.20 à 0.80m. Apport colluvial. Texture fine à grossière. Drainage correct à excessif.		+++	II
		Erosion en nappes, rigoles, ravines et ravins bordant certains cours d'eau.	Texture hétérogène. Milieu instable.	22	0	IV
FORMES D'APLANISSEMENT	CUIRASSES RELIEF ONDULE, FOSSILISE PAR UNE CUIRASSE.	Forme convexe cuirassée. Pente de 2 à 5 ‰, modelé résistant à l'érosion linéaire.	Profondeur: 0.05 à 0.20m. Cuirasse à démantèlement gravillonnaire recouvrement limono-sableux irrégulier. Présence de blocs de cuirasse.	31	0	IV
		Dissection inactuelle des collines. Forme diverse résultant de l'injection de Dolérite dans les grès. Pente de 5 à 20 ‰.	Profondeur: 0.05 à 0.20m. Cuirasse à démantèlement gravillonnaire recouvrement sablo-limono-sableux irrégulier. Présence de blocs de cuirasse. Altération en boules de Dolérite.	32	0	IV
	BASSES CROUPES GLACIS D'EROSION CARAPACES	Forme faiblement convexe, versant. Pente $\geq 2 ‰$. Modelé sensible à toutes les formes d'érosion.	Profondeur: 0.10 à 0.20m. Carapace à recouvrement limono-sableux. Cuirasse de bas de pente, plage de gravillons.	33	+	II
		Relief résiduel en croupes faiblement convexes, versant. Pente $\geq 2 ‰$. Passage graduel avec les formes dominantes ou dominées.	Profondeur: 0.10 à 0.30m. Recouvrement superficiel de sable grossier, en plages irrégulières et discontinues. Présence de grès en dalles.	34	0	IV
	SURFACE D'APLANISSEMENT, CROUPE ET VAL-LON.	Modelé de dissection onduleux, persistance de plages cuirassées ou carapacées sur les sommets.	Profondeur variable: 0.20 à 0.60m. Texture grossière sur les sommets. Texture moyenne à fine sur les versants et dans les fonds.	35	++	II

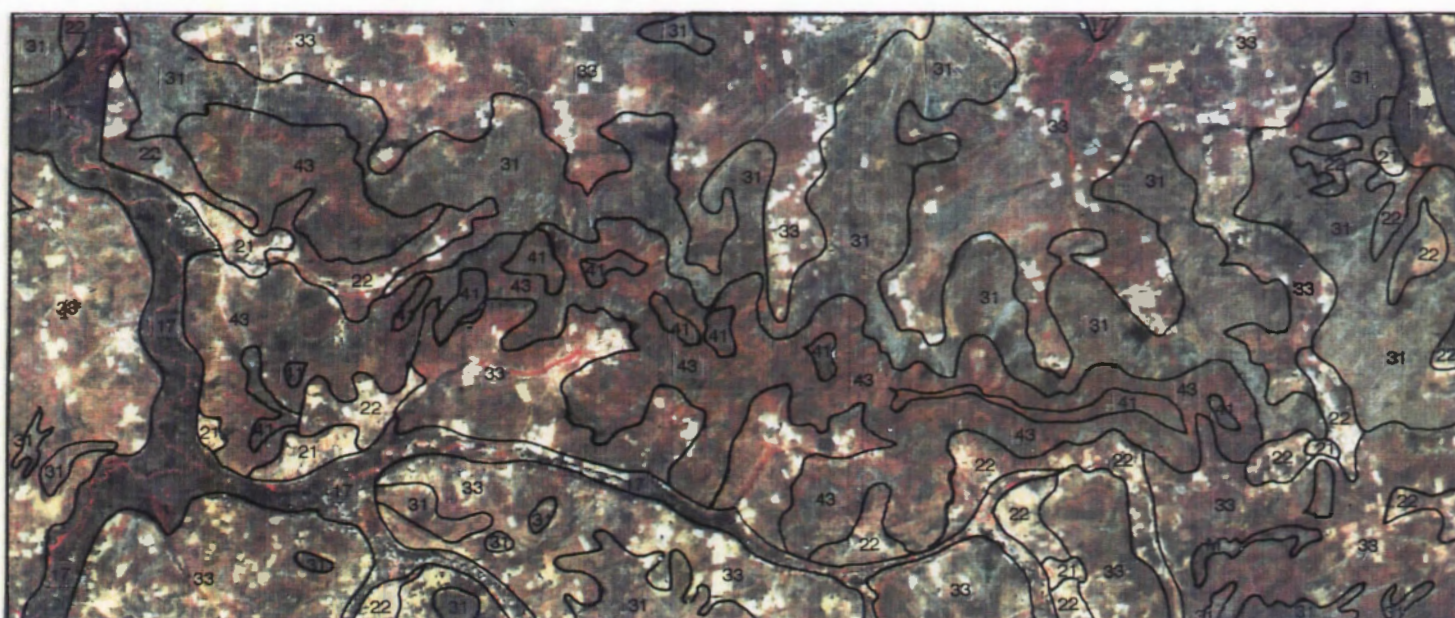
UNITES MORPHOPEDOLOGIQUES		TOPOGRAPHIE	MATERIAUX	UM	UA	UP
FORMES DE DISSECTION	RELIEFS TABULAIRES A SOMMETS CUIRASSES	Massif tabulaire coiffé d'une cuirasse horizontale ou bombée.	Profondeur: 0.05 à 0.15m. Cuirasse à démantèlement gravillonnaire Recouvrement limoneux irrégulier. Présence de mares et de blocs de cuirasse.	41	0	IV
			Système de bowés.	42	0	IV
	INFLUENCES PAR LE SUBSTRATUM	Versant de plateaux. Pente forte: 20 à 70 %. Topographie irrégulière, gradin et empilement de bancs gréseux.	Profondeur irrégulière. Texture fine ou grossière. Gravillon, bloc de cuirasse, de grès, de dolérite. Lambeau de cuirasse.	43	+	IV
		Buttes de Dolérite. Buttes et chaînes témoins d'un ancien massif gréseux.				
	RELIEF GRESSEUX	Long versant largement cuirassé. Pente faible de 2 à 5 %.	Profondeur: 0.05 à 0.20m. Cuirasse à démantèlement gravillonnaire recouvrement limoneux irrégulier.	44	0	IV
		Eboulis. Alternance anarchique de chaos rocheux et de macro zones sableuses irrégulières	Lentille de sol. Texture hétérogène souvent grossière. Apport en eau latéral conséquent.	45	+	IV
FORMES DIVERSES A RECouvreMENT SABLEUX (influencées par le substratum)	BASSE COLLINE	Modèle irrégulier, mollement ondulé. Pente 2 à 5 %.	Profondeur: 0.30 à 1 m. Texture sableuse sur les buttes, limono-sableuse dans les dépressions. Sable vif en voile mobile, alternant avec des encroûtements limoneux et des plages gravillonnaires. Localement affleurement de la cuirasse.	51	+	II
	GLACIS	Plaine ou forme faiblement inclinée. Pente 2 à 6 %. Localement présence d'érosion en ravines	Profondeur: 0.30 à 1 m. Texture hétérogène fonction de l'épaisseur du voile sableux plus ou moins discontinu.	52	+	II
	RELIEFS TABULAIRES	Plateau horizontal dominant nettement les formes environnantes. Localement large vallée bien encaissée dans le plateau.	Non prospecté sur le terrain.	53 54	0 +	IV II
DUNES FIXES ET DEPOTS SABLEUX ANCIENS	FORME ALLUVIALE CARACTERISEE PAR DES DEPRESSIONS ET DES BUTTES SABLO-LIMONEUSES	Plaine horizontale ou peu inclinée, Pente ≤ 2 %. Réseau de drainage lâche. Mare temporaire.	Profondeur: 2 m. Texture sableuse en surface, limono-argileuse sur le reste du profil.	61	++	II
	FORME DIVERSE ENCOUSEE	Plaine horizontale sans réseau de drainage. Localement voile ou dépôt éolien plus ou moins important.	Profondeur: 2 m. Texture sableuse pour les recouvrements éoliens et sablo-argilo-limoneuse sur le reste du profil.	62	+	II
	MAELON ET CHAMP DE CHABLIS	Modèle mollement bosselé sans réseau de drainage.	Profondeur: 2 m. Texture sableuse dominante, argilo-limoneuse dans les dépressions.	63	+	IV
	CHAMPS DE DUNES TRANSVERSALES ORIENTES OSO-ENE	Cordon dunaire.		64	+	IV
		Cordon dunaire massif.		65	0	IV
	DEPOTS EOLIEN SUR SYSTEME DE PALEO- VALLEES	Lit constitué d'un réseau de chenaux entéromorphes.	Profondeur: 2 m. Recouvrement sableux sur dépôts alluvial ancien à texture fine.	66	++	II
FORME ALLUVIALE DIVERSE		Dépression plus ou moins hydromorphe en périphérie de certaines mares temporaires ou d'anciens axes de drainage.	Profondeur: > 1m. Texture argilo-limono-sableuse en surface sur dépôt de galets ou horizon sableux.	67	+	III

EXTRAIT DE LA CARTOGRAPHIE MORPHOPÉDOLOGIQUE



KJ 47-323 5/12/87 NORD TOMINIAN

M	Mare	21	Bas glacis d'épandahe
11	Délaissé de rivière	22	Haut glacis d'épandage
12	Chenal longitudinal	31	Basses collines cuirassées
13	Plaine alluviale	33	Basses croupes, glacis d'érosion carapacé
17	Basse plaine alluviale	16V	Zone de battement des crues du Bani



KJ 46-327 27/2/87 NORD SIKASSO

17	Basse plaine inondable	33	Basses croupes, glacis d'érosion carapacés
21	Bas glacis d'épandage	41	Bowé de plateau
22	Haut glacis d'épandage	43	Versant de plateau, gradins, bancs gréseux
31	Basses collines cuirassées	M	Mare

24 Cartographie morphopédologique - légendes particulières

Les tableaux qui suivent décrivent les unités morphopédologiques qui sont spécifiques à certaines régions naturelles du Mali (principalement Centre Est et Ouest du Pays).

MORPHOPEDOLOGIE DE LA REGION NATURELLE DE HODJ-EST ET DE AKLE AZAOUAD

UNITES MORPHOPEDOLOGIQUES		TOPOGRAPHIE	MATERIAUX	UM	UA	UP
PAVEMENT DESERTIQUE		Plaine horizontale un peu inclinée. Pente : 0 à 2%	Matériel détritique grossier, cailloutis abondant sur le continental intercolaire	47Ar	63Po	IV
FORMES DE DISSECTION	RELIEF RESIDUEL	Dissection d'un ancien massif rocheux.	Roche en place, localement remaniée. Voile sableux mobile en plages sporadiques.	47A	56Bo	IV
FORMES DIVERSES A RECOUVREMENT SABLEUX (influencées par le substratum)	BASSE COLLINE	Modelé irrégulier, mollement ondulé. Pente : 2 à 5 %	Profondeur : 0,30 à 1 m. Texture sableuse sur les buttes, limono-sableuse dans les dépressions. Sable vif en voile mobile, alternant avec des encroûtements limoneux et plages gravillonnaires. Localement affleurement de la cuirasse.	51A	63o	IV
DUNES FIXEES ET DEPOTS SABLEUX ANCIENS	FORME DIVERSE EMOUSEE	Plaine horizontale sans réseau de drainage. Localement voile ou dépôt éolien plus ou moins important.	Profondeur : ≥ 1 m. Texture : sablo-limoneux sur limon argilo-sableux. Bon drainage.	62A	61s+	II
	MAMELON ET CHAMP DE CHABLIS	Modelé mollement bosselé sans réseau de drainage.	Profondeur : ≥ 1 m. Texture sableuse dominante, localement limono-argileux dans les inter dunes. Drainage excessif.	63A	62o	II
	CHAMPS DE DUNES TRANSVERSALES ORIENTES OSO-ENE	Cordon dunaire. Massif stabilisé.		65A	71+o	II

UNITES MORPHOLOGISTIQUES			TOPOGRAPHIE	MATERIAUX	UM	UA	UP
FORMES 							

MORPHOPEDOLOGIE DE LA ZONE LACUSTRE

UNITES MORPHOPEDOLOGIQUES		TOPOGRAPHIE	MATERIAUX	UM	UA	UP
FORMES D'ACCUMULATION	ALLUVIONS	Chenal de débordement et de vidange, cuvettes de décantation sans vidange possible. Inondation sévère, localement permanente. Pente: 0 à 1 %.	Profondeur: ≥ 1m. Texture: limon fin sur limon argileux lourd. Présence de gley dès la surface, tendance verticale. Mauvais drainage.	11L	0	III
		Basse plaine d'épandage de débordement. Inondation sévère, mais limitée. Pente: 0 à 2 %.	Profondeur: ≥ 1m. Texture sablo-limoneux sur limon argileux, sableux gleyfié. Mauvais drainage.	12L	+	III
	RECENTES	Basse plaine désormais peu affectée par les inondations. Remplissage sporadique, irrégulier, et de moins en moins fréquent. Pente: 0 à 3 %.	Profondeur: ≥ 0.80m. Texture: argile gleyfié dominant sur tout le profil. Mauvais drainage.	13L	++	II
		Zone maintenant hors d'atteinte des crues saisonnières.		14L	++	II
DUNES FIXES ET DEPOTS SABLEUX ANTIENS	FORME DIVERSE ENOUSSEE	Massif dunaire stabilisé en grands cordons longitudinaux.	Profondeur: ≥ 1m. Texture: sablo-limoneux sur tout le profil. Structure particulière en surface à mordée sur le reste du profil. Drainage excessif.	62L	0	II
	MAHELON ET CHAMP DE CHABLIS	Modelé mollement bosselé sans réseau de drainage.	Profondeur: ≥ 1m. Texture sableuse dominante, argilo-limoneuse dans les dépressions.	63L	+	II

MORPHOLOGIE DE LA REGION NATURELLE DU GOURMA

UNITES MORPHOLOGISQUES		TOPOGRAPHIE	MATERIAUX	UM	UA	UP
D'ACCUMULATION	ALLUVIONS RECENTES	Vallée étroite et sinueuse, zone de ruissellement concentrée, cuvettes. Inondation périodique, fonction de la topographie.	Profondeur: 0.50 à 1m. Texture variable selon la situation topographique, généralement fine avec recouvrement sableux discontinu et irrégulier.	146	++	III
	ALLUVIONS ANCIENNES	Plaine alluviale horizontale ou peu inclinée. Pente: $\leq 2\%$. Réseau de drainage lâche. Mare temporaire.	Profondeur $\geq 1m$. Texture sablo-limoneuse en surface. limono-sableuse sur le reste du profil. Bon drainage.	616	++	II
	GLACIS	Glacis colluvial en piedmont de la falaise de Bandiagara. Passage graduel avec la plaine. Réseau de chenaux \pm stables. Pente: 2 à 6 %.	Profondeur: 0.30 à 0.80m. Texture hétérogène, fine à grossière. Drainage latéral excessif.	216C	++	II
		Glacis d'épandage. Pente: 2 à 6 % . Présence sporadique d'affleurements rocheux et de cuirasses de bas de pente.	Profondeur: 0.20 à 0.80m. Apport colluvial. Texture fine à grossière. Drainage correct à excessif.	216	++	II
		Glacis de dénudation.	Même caractéristique que l'unité précédente, mais dégradation des sols très avancée. Présence fréquente de matériel grossier.	216D	0	IV
FORMES	CUIRASSES BASSE DROUPE. FAIBLE ONDULATION. GLACIS CUIRASSE.	Forme convexe cuirassée. Pente: 2 à 5 %. Modelé résistant à l'érosion linéaire.	Profondeur: 0.10 à 0.50m. Cuirasse à démantèlement gravillonnaire. Recouvrement limoneux lourd irrégulier. Affleurement fréquent de la cuirasse.	316	0	IV
D'APLANISSEMENT	DEMANTELES BASSE DROUPE. GLACIS D'EROSION CARAPACE.	Formes faiblement convexe, versant. Pente: $\leq 2\%$. Modelé sensible à toutes les formes d'érosion.	Profondeur : 0.20 à 0.60m. Carapace à recouvrement limono-sableux. Cuirasse de bas de pente. Plage de gravillons.	336	0	IV
DUNES FIXES ET DEPOTS SABLEUX ANCIENS	FORME DIVERSE ENCRUSEE	Plaine horizontale sans réseau de drainage. Localement voile ou dépôt éolien plus ou moins important.	Profondeur: $\geq 1m$. Texture sableuse pour les recouvrements éoliens et sablo-argilo-limoneuse pour le reste du profil.	626	++	II
	MAELON ET CHAMP DE CHALIS	Modelé mollement bosselé sans réseau de drainage.	Profondeur: $\geq 1m$. Texture sableuse dominante, argilo-limoneuse dans les dépressions.	636	0	II
	RUANDS DE DUNES TRANSVERSALES ORIENTES OCCIDENT	Cordon dunaire.		646	0	II

MORPHOPEDOLOGIE DE LA REGION NATURELLE DE BANDIAGARA

UNITES MORPHOPEDOLOGIQUES			TOPOGRAPHIE	MATERIAUX	UM	UA	UP
FORMES D'ACCUMULATION	DEPOTS ALLUVIAUX RECENTS		Vallée étroite et encaissée, généralement fond de failles. Eboulis rocheux fréquents.	Profondeur: 0.40 à 0.80m. Apport alluvio-colluvial. Texture fine, localement recouvrement sableux.	14B	+++	I
	GLACIS D'EPANDAGE		Plaine, pente: 2 à 6 %. Présence d'une nappe phréatique.	Apport alluvio-colluvial. Texture limono-sableuse à sableuse. Sol anthropique.	21B	++++	I
			Plaine, pente de 2 à 6 %, présence fréquente d'affleurements gréseux et de blocs rocheux.	Profondeur variable: 0.20 à 0.80m. Apport colluvial. Texture fine à grossière, généralement sableuse. Drainage correcte à excessif.		+++	II
FORMES DE DISSECTION	PLATEAU GRESEUX DE BANDIAGARA	RELIEFS	Plateau, massif, butte, à nettes influences structurales. Roche en place en toutes positions, failles et diaclases.	Rare poche de sol localisée de préférence en fond de failles et de diaclases.	47B	O	IV
		GRESEUX	Modelé collinaire vigoureux, persistance de gradins affectant certains versants et de dalles affleurantes sommitales.	Lithosol, regosol. Localement recouvrement sablo-limoneux superficiel.	48B	+	IV
			Lambeau de plateau fossilisé par une cuirasse en limite nette avec les formes dominées.	Cuirasse à démantèlement gravillonnaire Recouvrement sablo-limoneux par endroits	49B	O	IV

MORPHOLOGIE DE LA REGION NATURELLE DU SENO - BORDO

UNITES MORPHOLOGIQUES			TOPOGRAPHIE	MATERIAUX	UN	UA	UP
FORMES D'ACCUMULATION	PLAINE	DEPOTS ALLUVIAUX	Plaine régulièrement affectée par des dépressions d'ordre hectométrique et/ou décamétrique, pente 2 à 4 % . Engorgement saisonnier localisé.	Profondeur: 0.50 à 1m. Texture variable selon la position topographique, fine à mauvais drainage dans les creux, sableux sur les buttes.	14S	+	III
			Plaine alluviale. Pente: 0 à 3 % .	Profondeur: 2 m. Texture limono-sableuse en surface sur limono-argileux, gleyfié. Mauvais drainage, hydromorphie.	15S	+	III
		RECENTS	Basse plaine à engorgement prolongé. Inondation périodique.	Profondeur: 2 m. Texture fine sur l'ensemble du profil, gleyfiée, hydromorphie par inondation et remontée de la nappe.	16S	+	III
			Dépression ± importante, généralement hydromorphe, pente < 2 % , engorgement saisonnier, parfois sévère.	Profondeur: 2 m. Texture lourde sur l'ensemble du profil à drainage bloqué.	17S	+	III
	DU SENO-	DEPOTS ALLUVIAUX	Ancienne plaine alluviale. Pente: 0 à 2 % .	Profondeur: 2 0.80m. Texture: limon en surface sur limon argileux. Présence d'un horizon calcique. Bon drainage.	61S	++++	I
		ANTIENS	Ancienne plaine alluviale avec glacié de dénudation fréquent et affectée par des dépressions. Pente: 0 à 3 % .	Même caractéristiques que l'unité précédente mais localement présence de plages gravillonnaires.	61SD	+	IV
FORMES DIVERSES A RECOURVEMENT SABLEUX (influencées par le substratum)	BORDO	BASSES COLLINES	Modelé irrégulier, mollement ondulé. Pente 2 à 5 % .	Profondeur: 0.30 à 1m. Texture sableuse sur les buttes, limono-sableuse dans les dépressions. Sable vif en voile mobile, alternant avec des encroûtements limoneux et des plages gravillonnaires. Localement affleurement de la cuirasse.	51S	0	IV
				Profondeur: < 0.30m Même caractéristiques que l'unité précédente, mais dégradation des sols très avancée.	51SD	0	IV
		GLACIS	Plaine ou forme faiblement inclinée. Pente 2 à 6 % . Localement présence d'érosion en ravines	Profondeur: 0.30 à 1 m. Texture hétérogène fonction de l'épaisseur du voile sableux plus ou moins discontinu.	52S	+	IV

MORPHOPEDOLOGIE DE LA BOUCLE DU NIGER

UNITES MORPHOPEDOLOGIQUES		TOPOGRAPHIE	MATERIAUX	UM	UA	UP
SYSTEME DES ALLUVIONS RECENTES DU FLEUVE NIGER de Tombouctou à Labbezanga	ALLUVIONS	Basses plaines d'inondation, cuvettes de décantation, chenaux, bras morts. Vidange très difficile. Inondation très sévère, saisonnière et de longue durée.	Profondeur : 2 m. Sols d'apports annuels d'alluvions. Texture hétérogène.	11N	RIZ ++	III
	INONDABLES	Complexe des levées étroites non inondables et des chenaux inondables. Localement inondation saisonnière, limitée et irrégulière.		12N	O	IV
	ALLUVIONS	Alluvions désormais hors d'atteinte des crues, généralement situées en périphérie de la zone inondable. Inondation exceptionnelle.	Profondeur : 2 m. Sols d'apports alluviales. Texture hétérogène.	13N	O	III
	EXONDES	Haute terrasses, levées de berge, bourrelets alluviales. Inondation exceptionnelle et localisée.	Profondeur : 2 m. Texture hétérogène, à galets, gravillons sable fin, et limon.	14N	+	II
SYSTEMES DES MARES ET DES VALLEES ALLUVIALES EN ZONE ARIDE	ALLUVIONS	Mares temporaires en milieux sableux et sur schistes.	Profondeur : 2 m. Sols vertiques à argiles mailles sur tout le profil.	M	O	IV
	IRREGULIEREMENT	Zone de battements des inondations en périphérie des mares.	Larges fissures à l'état sec.	67N	O	III
	INONDABLES	Voies de drainages à engorgements saisonniers irréguliers fonction des précipitations.	Profondeur : 2 m. Texture limono-sableux sur limon argileux hydromorphe à gley. Mauvais drainage.	16N	+	III
	DEPOTS EOLIEN SUR SYSTEME DE PAL-LEOVALLES, DUED TEMPORAIRE	Anciens axes de drainage, localement dépressions en chapelets à engorgement temporaire et très irrégulier.	Profondeur : 2 m. Recouvrement éolien important sur dépôts alluviaux anciens à texture fine.	66N	+	II
DUNES FIXES ET DEPOTS SABLEUX	SABLE PENEPLAINE ET INTERDUNES	Plaine horizontale à légèrement inclinée sans réseau de drainage. Localement formes diverses écroussées.	Profondeur : 2 m. Texture sableuse sur limon argilo-sableux. Bon drainage.	62N	++	II
	CHAMP DE DUNES RETICULEES	Dunes fixées de formes diverses. Localement sable mobile. Sensibilité à l'érosion éolienne.	Profondeur : 2 m. Texture sableuse sur tout le profil. Drainage bon à excessif.	63N	O	II
	CHAMP DE DUNES TRANSVERSALES	Cordons dunaires, anciens massifs à peu développés.		65N	O	II
FORMES D'APLANISSEMENT	REG " PAVEMENT DESERTIQUE "	Plaine horizontale ou faiblement inclinée. Localement présence de chicots rocheux.	Matériel détritique grossier. Cailloux abondants alternant parfois avec des plages limoneuses compactes.	47N	O	IV
	BASSES COLLINES CUIRASSEES ET AFFLEUREMENT DU SUBSTRATUM	Formes convexes cuirassées ou plateaux résiduels. Localement arêtes rocheuses.	Profondeur : 0,10 à 0,30 m. Affleurement fréquent de la cuirasse et du substratum.	31N	O	IV
COMPLEXE DES DEPOTS EOLIENS DIVERS ET DU REG	GLACIS D'EPANDAGE	Généralement plaines localisées en pied-vent des collines cuirassées.	Recouvrement sableux discontinu et superficiel.	62N 31N	O	IV
	SABLE PENEPLAINE EN COUVERTURE IMPORTANTE, LOCALEMENT REG ET LIMON ASSOCIES	Plaine horizontale légèrement ondulée. Dépôt éolien irrégulier mais très fréquent en mosaïques sur le reg sous-jacent.	Profondeur et texture fonction du matériel en place. Dépôts sableux peu profonds, mais dominants.	62N 47N	O	II
	DEPOTS SABLEUX EN FORMATION SPORADIQUE SUR REG ET LIMON ASSOCIES	Plaine horizontale. Dépôt éolien en voile instable, discontinu et superficiel sur le reg sous-jacent.	Plages dispersées et irrégulières de sable généralement peu profond. Cailloutis dominants.	47N 62N	O	IV
	CHAMP DE DUNES RETICULEES OU LONGITUDINALES	Mêmes caractéristiques que les unités 63N et 65N, mais manifestations localisées du reg dans les inter-dunes.	Caractéristiques identiques aux unités 63N et 65N, mais champ de cailloutis localisé dans les inter-dunes.	63N 47N	O	II

Chapitre 3

TELEDETECTION ET CARTOGRAPHIE DE LA VEGETATION

3 TELEDETECTION ET CARTOGRAPHIE DE LA VEGETATION

31 Méthodologie

Comme il a été exposé précédemment, la délimitation d'unités morphopédologiques sur l'image satellite a constitué la première étape du travail. Basée sur les résultats obtenus sur les 600 000 ha inventoriés et cartographiés en première phase, cette approche se justifie par les constats suivants :

- a) en dépit des différences de stock ligneux liées aux différents degrés de dégradation anthropique, le potentiel de régénération et de productivité de ces formations ligneuses reste fortement dépendant des composantes morphopédologiques (dans le contexte bioclimatique du Mali).
- b) compte tenu des variabilités des réponses spectrales attribuables à la végétation ligneuse (date d'enregistrement, impact des feux de brousse, densité variable de ligneux, état phénologique, etc...) seule l'approche morphopédologique permet une première stratification homogène et régulière sur une superficie aussi importante.

L'interprétation visuelle des réponses spectrales de la végétation a été réalisée par référence aux zones-tests inventoriées et cartographiées au 1/50 000.

Cette information constitue une "vérité terrain" accumulée en préalable à l'enregistrement des images pour des raisons de chronologie de mise en oeuvre du projet deux ans avant le lancement du satellite SPOT.

Le choix de la localisation de ces zones résulte d'une stratification préliminaire basée sur l'information existante.

Bien que ces zones test soient relativement peu nombreuses (16) compte tenu de la surface à cartographier, l'étude de ces zones constitue une base de donnée sur la distribution de la végétation, l'écologie, les essences ligneuses, ceci constituant une densité d'information rarement mise à la disposition d'un travail de télédétection dans ce domaine. C'est d'ailleurs grâce à cette information qu'a pu être mise en oeuvre une procédure de contrôles de terrain complémentaires statistiquement fiable.

La méthodologie utilisée a été la suivante :

- a) réduction au 1/200 000° des cartes de la végétation et des cartes morphopédologiques réalisées au 1/50 000° sur les zones-tests.

SCENES KJ 42-328 et 42-329

du 21 FEVRIER 1987

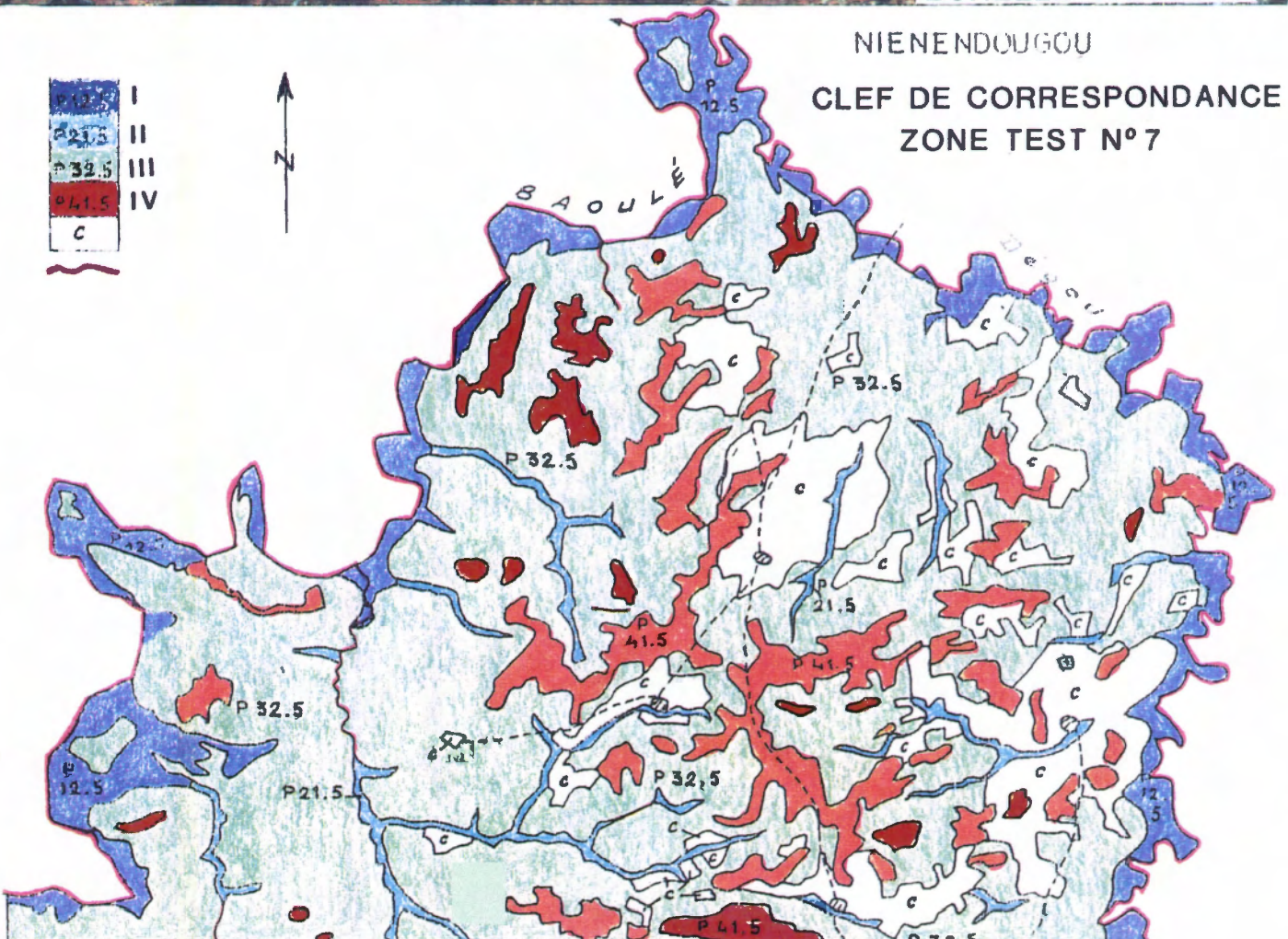


ECHELLE 1/200000

NIENENDOUGOU

CLEF DE CORRESPONDANCE
ZONE TEST N°7

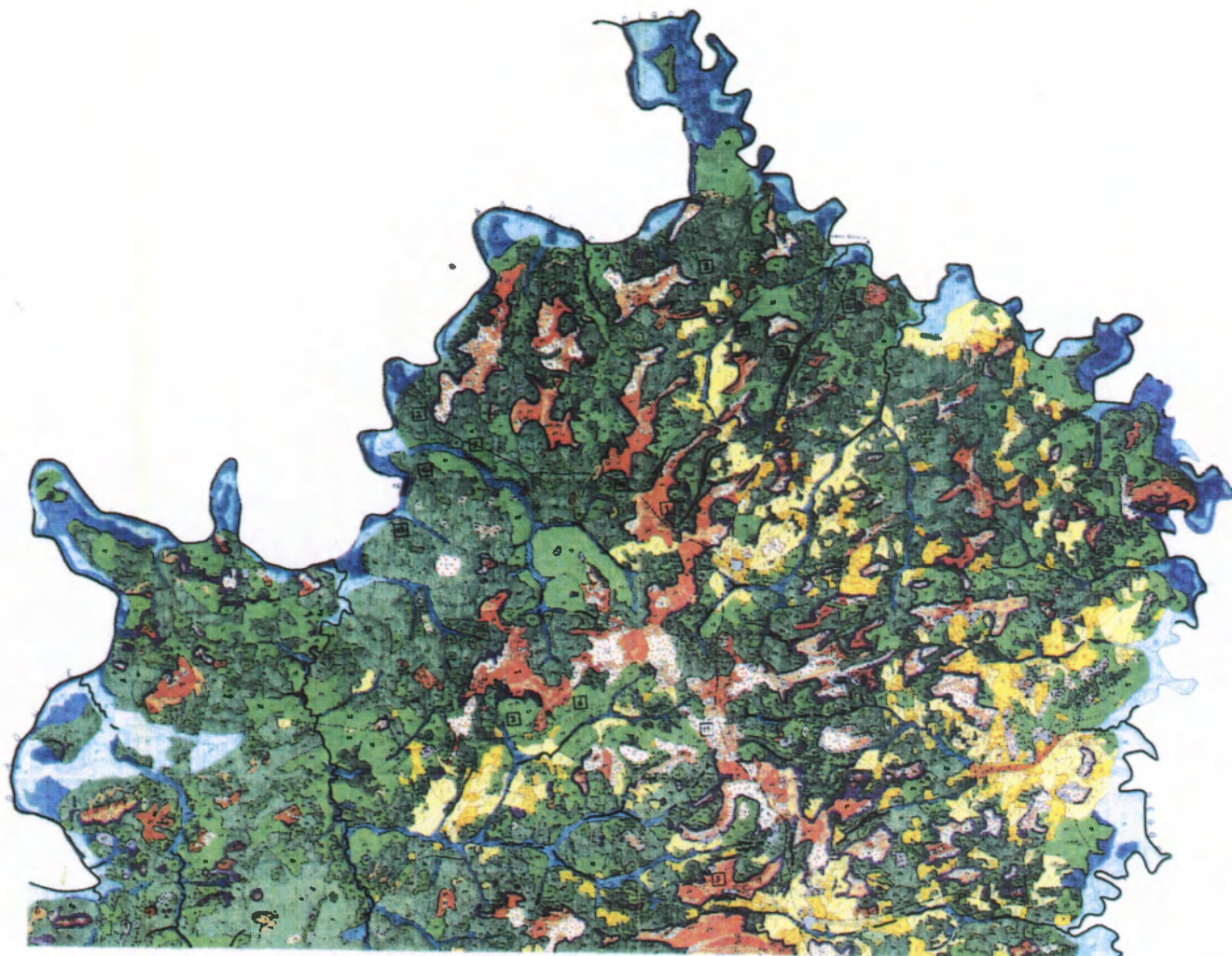
P 12.5	I
P 21.5	II
P 32.5	III
P 41.5	IV
C	



CARTE DES FORMATIONS VEGETALES

ZONE DE NIENENDOUGOU

ECHELLE 1/200000



REDUCTION DE LA CARTE AU 1/50 000 DE LA ZONE TEST N° 7

PAYSAGES VEGETAUX ASSOCIES AUX	PLUVIOMETRIE (mm/ha)	VEGETATION	%	CARACTERISTIQUES DE L'ETAGE DOMINANT	VOLUME BRUT MOYEN / HA	CODE
DEPOTS ALLUVIAUX RECENTS DU BAOULE ET DU DEGOU	1200 à 1400	GALERIES ET FOURRES RIPICOLES DE TYPE GUINEEN MARECAGEUX	5	DIOSPYROS ELLIOTII DIALIUM GUINEENSE PTEROCARPUS SANTALINOIDES	≥ 150	I P 12,5
		PRAIRIES HYGROPHILES	95		quasi nul	
VALLEES ETROITES ET SINUEUSES	1200 à 1400	GALERIES DE TYPE GUINEEN ET FORMATIONS HYGROPHILES ASSOCIEES	100	BERLINIA GRANDIFLORA DANIELLIA OLIVERI ERYTHROPHLEUM GUINEENSE	50 80 2 200 galerie	II P 21,5
GLACIS D'EPANDAGES	1200 à 1400	FORETS CLAIRES	65	ISOBERLINIA DOKA UAPACA TOGOENSIS	80 90	III P 32,5
		SAVANES BOISEES	35	PTEROCARPUS ERINACEUS ISOBERLINIA DOKA	30 40	
BASSES COLLINES ET BAS PLATEAUX CUIRASSES	1200 à 1400	SAVANES BOISEES	25	ISOBERLINIA DOKA LOPHIRA LANCEOLATA PTEROCARPUS ERINACEUS	15 20	IV P 41,5
		BOWE NUS	15	COMBRETUM SPP LANNEA MICROCARPA	≤ 10	
		FORETS CLAIRES	60	ISOBERLINIA DOKA PARINARI CURATELLIFOLIA BURKEA AFRICANA	40 50	

- b) Confrontation avec l'image SPOT au 1/200 000°.
- c) Recherche et délimitation d'unités communes aux zones tests et cartographiables sur l'image.
- d) Test d'extrapolation de ces unités sur l'image en-dehors de la partie couverte par zone la test.
- e) Définition d'une typologie des unités de base qui seront cartographiées sur l'imagerie satellite.

Les extraits de carte présentés pages 41 et 42 illustrent la méthode utilisée. Sauf cas particulier la cartographie finale s'éloignera assez peu de la délimitation préliminaire des unités morphopédologique, si ce n'est pour regrouper certaines d'entre elles en unités de paysage végétal.

L'interprétation visuelle des réponses spectrales attribuables à la végétation ligneuse s'est révélée très utile dans les situations extrêmes suivantes :

- densité de ligneux très faible ou nulle ce qui est le cas des cuirasses dénudées ou des savanes inondables facilement identifiables sur les photographies aériennes (<5m³/ha) et bien sur des zones en cultures et jachères récentes
- densité de ligneux relativement fortes comme des galeries forestières, les forêts sèches claires ou certaines savanes boisées (50 à 100 m³/ha).

Il est évident que les "poids" respectifs que représente deux catégories dans une estimation de volume au prorata des superficies correspondantes est très important.

Les essais réalisés en traitement numérique des images non altérées par les feux de brousse montrent les possibilités d'évaluation relativement fines et fiables par comptage de pixels des deux catégories "extrêmes" une fois qu'elles sont bien identifiées. Cet aspect sera développé en annexe.

32 Critères de définition des unités de la carte de la végétation

Les tableaux qui suivent explicitent la légende définitive de la carte de la végétation le contenu de ces tableaux étant présenté avec la terminologie suivante :

- * Paysages végétaux associés aux unités morphopédologiques. Cette première colonne identifie l'unité morphopédologique de premier niveau, la notion de paysage végétal impliquant l'ensemble des formations végétales qui composent ce paysage et qui ne sont pas délimitées sur la carte de la végétation.
Le code de ces paysages comprend la lettre P. (Paysages) destinées à éviter la confusion avec d'autres données chiffrées, suivie de deux chiffres définissant l'unité de paysage végétal.

* Pluviométrie

Cette donnée subdivise les paysages végétaux en fonction de la zone bioclimatique où ils se trouvent localisés. Les références pluviométriques sont celles des isohètes 1922-1980 qui reflètent le mieux la distribution de la végétation et qui partagent la zone d'inventaire en six domaines bioclimatique codé de 0 à 5 de la façon suivante :

0 : < 400 mm	Sahélien nord
1 : 400 - 600 mm	Sahélien sud
2 : 600 - 800 mm	Soudanien nord
3 : 800 - 1000 mm	Soudanien nord/transition sud
4 : 1000 - 1200 mm	Soudanien sud
5 : > 1200 mm	Soudano-guinéen

Ce code constitue le 3ème chiffre permettant d'identifier l'unité cartographique (UC), la présence de deux chiffres à ce niveau indiquant la représentation de l'unité dans 2 ou plusieurs domaines bioclimatiques (Ex. UC codée P12.3.4 identifie les paysages végétaux associés aux dépôts alluviaux récents des grands cours d'eau (P12) localisés dans les domaines bioclimatiques 3 et 4 (isohètes 800 à 1 200mm).

* Composition de l'unité cartographique

Cette colonne résume le ou les types physiologiques de végétation, les plus représentés dans l'unité. Lorsque 2 ou 3 composantes sont mentionnées le pourcentage respectif de leur présence est indiqué dans le tableau.

Au stade des estimations de volume ces composantes ont été quelques fois encore subdivisées lorsque des données étaient à la fois disponibles et significatives pour préciser ces estimations.

On trouvera une description plus précise de ces composantes dans le chapitre consacré à la description des paysages végétaux.

* Principales espèces ligneuses de l'étage dominant

Seules les espèces à la fois les plus présentes et représentatives sont citées (au maximum 5). Des listes plus complètes sont décrites dans le chapitre sur la végétation de ce rapport ainsi que dans le rapport de synthèse régionale qui les mentionnent au niveau de l'unité administrative du Cercle.

* Volumes bruts

Ces volumes sont généralement exprimés sous la forme d'une "fourchette" caractérisant les composantes de l'unité cartographique et destinées à fournir un ordre de grandeur.

Le volume brut sur pied s'entend sur écorce, toutes espèces confondues, à la découpe du 3 cm.

* Volumes moyens de l'UC

Ce chiffre est calculé à partir de celui des composantes de l'unité au prorata des pourcentages respectifs de surface.

* Unités morphopédologiques

Cette colonne renvoie aux codes des unités de la cartographie morphopédologique (unités de paysage végétal, évaluation des aptitudes et contraintes agricoles).

Il est apparu utile d'illustrer ces tableaux par quelques extraits d'image satellite représentatifs des principales unités de paysage végétal décrites dans ces tableaux et positionnées sur ces images avec le code correspondant.

33. Cartographie de la végétation - Légende générale

Les tableaux qui suivent décrivent les unités cartographiques qui sont largement représentées sur la partie Ouest et Centre du Mali inventorié.

PAYSAGES VEGETAUX ASSOCIES AUX(X) :	PLUVIOMETRIES (mm/an)	UNITES CARTOGRAPHI- QUES (UC)	COMPOSITION DE L'UNITE	%	PRINCIPALES ESPECES LIGNEUSES DE L'ETAGE DOMINANT	VOLUMES BRUTS (m3/ha)	VOLUMES MOYENS DE L'UC (m3/ha)	UNITES MORPHO-PEDO- (UM)
P 11 : Système de chenaux longi- tudinaux en bordure des grands cours d'eau.	Indifférente	P11	Formation ligneuse hygrophile.	10	<i>Pterocarpus santalinoïdes</i> <i>Cynometra vogelii</i>	50 - 100	####	12
			Formation ligneuse hygrophile et de bourrelets dégradés.	90	<i>Myrtagina inermis</i> <i>Piliostigma reticulatum</i>	< 20		18
P 12 : Dégâts alluviaux récents variables des grands cours d'eau.	< 800	P12.0/2	Prairie hygrophile. Rare plage boisée locale.	95	<i>Daniellia oliveri</i> (sporadique)	< 5	####	16
			Galerie de type sahélien inondable.	5	<i>Diospyros</i> spp <i>Pterocarpus santalinoïdes</i> <i>Ficus trichopoda</i>	30 - 60		15
	800 à 1200	P12.3.4	Prairie hygrophile. Rare plage boisée locale.	95	<i>Daniellia oliveri</i> (sporadique)	< 5	####	16
			Galerie de type guinéen inondable.	5	<i>Diospyros</i> spp <i>Pterocarpus santalinoïdes</i> <i>Ficus trichopoda</i>	50 - 80		15
	1200 et +	P12.5	Prairie hygrophile. Rare plage boisée locale.	95	<i>Daniellia oliveri</i> (sporadique)	< 5	####	16
			Galerie de type guinéen inondable.	5	<i>Diospyros</i> spp <i>Pterocarpus santalinoïdes</i> <i>Ficus trichopoda</i>	80 - 100		15
P 13 : Système de mares temporai- res.	< 1000	P13.0/3	Fourré ou formation boisée hygrophile.	100	<i>Myrtagina inermis</i> <i>Anogeissus leiocarpus</i> <i>Acacia</i> spp <i>Ziziphus mauritiana</i>	30 - 50	####	M
P 21 : Vallées étroites et sinu- euses.	400 à 600	P21.1	Frange ripicole de type sahélien et formation hygrophile associée.	100	<i>Anogeissus leiocarpus</i> <i>Myrtagina inermis</i> <i>Acacia nilotica</i>	20 - 40	####	14
	600 à 800	P21.2	Galerie de type soudano-sahélien et formation hygrophile associée.	100	<i>Anogeissus leiocarpus</i> <i>Myrtagina inermis</i> <i>Pterocarpus erinaceus</i> <i>Piliostigma reticulatum</i> <i>Diospyros mespiliformis</i>	40 - 60	####	14
	800 à 1000	P21.3	Galerie de type soudanien et formation hygrophile associée.	100	<i>Anogeissus leiocarpus</i> <i>Myrtagina inermis</i> <i>Pterocarpus erinaceus</i>	40 - 60 2100 galerie	80	14
	1000 à 1200	P21.4	Galerie de type guinéen et formation hygrophile associée.	100	<i>Berlinia grandiflora</i> <i>Daniellia oliveri</i> <i>Erythrophleum guineense</i>	60 - 80 2150 galerie	100	14
	1200 et +	P21.5	Galerie de type guinéen et formation hygrophile associée.	100	<i>Berlinia grandiflora</i> <i>Daniellia oliveri</i> <i>Erythrophleum guineense</i>	80 - 100 2200 galerie	150	14

PAYSAGES VEGETAUX ASSOCIES AU(X) :	PLUVIOMETRIES (mm/an)	UNITES CARTOGRAPHIQUES (UC)	COMPOSITION DE L'UNITE	Z	PRINCIPALES ESPECES LIGNEUSES DE L'ETAGE DOMINANT	VOLUMES BRUTS (m3/ha)	VOLUMES MOYENS DE L'UC (m3/ha)	UNITES MORPHO-PEDO (UR)	
P 31 : Glacis d'épandage.	400 à 600	P31.1	Savane verger. Dégradation anthropique diverse.	70 30	Acacia spp Adansonia digitata Sclerocarya birrea	10 - 15	13	21	
	600 à 800	P31.2	Savane verger. Dégradation anthropique diverse.	70 30	Vitellaria paradoxa Adansonia digitata Sclerocarya birrea	10 - 20	15	21	
	800 à 1000	P31.3	Savane verger. Dégradation anthropique diverse.	90 10	Vitellaria paradoxa Parkia biglobosa	15 - 25	20	21	
	1000 à 1200	P31.4	Savane verger. Savane boisée. Dégradation anthropique diverse.	100	Vitellaria paradoxa Parkia biglobosa	15 - 30	23	21	
	1200 et +	P31.5	Savane verger. Forêt claire. Dégradation anthropique diverse.	100	ou Isoberlinia doka Pterocarpus erinaceus Vitellaria paradoxa	25 - 55	30	21	
	600 à 800	P32.2	DOMAINE CLASSIQUE	Savane boisée.	100	Isoberlinia doka Pterocarpus erinaceus Burkea africana Lannea spp	20 - 30	25	21
	800 à 1000	P32.3		Savane boisée.	100	Isoberlinia doka Pterocarpus erinaceus Burkea africana Terminalia spp	20 - 35	27	21
	1000 à 1200	P32.4		Savane boisée. Forêt claire.	50 50	Isoberlinia doka Pterocarpus erinaceus Burkea africana Lannea spp	25 - 40	35	21
	1200 et +	P32.5		Forêt claire.	100	Terminalia spp	40 - 60	45	21
P 33 : Zones instables à érosion agressive.	400 à 600	P33.1	Formation buissonneuse très lâche.	100	Boscia spp Combretum micranthum	####	####	22	
	600 à 800	P33.2	Formation arbustive lâche et très irrégulière.	100	Acacia seyal Combretum micranthum Grewia bicolor	≤ 5	####	22	
	800 à 1200	P33.3,4	Formation arbustive lâche et très irrégulière.	100	Pterocarpus lucens Combretum micranthum Boscia salicifolia	≤ 5	####	22	
P 35 : Système de basses plaines ± argileuses.	< 600	P35.0,1	Steppe arborée ou arbustive. Formation hygrophile associée.	100	Acacia seyal Ziziphus mauritiana Acacia nilotica Balanites aegyptiaca	5 - 10	8	67 17	

PAYSAGES VEGETAUX ASSOCIES AU(X) :	PLUVIOMETRIES (mm/an)	UNITES CARTOGRAPHIQUES (UC)	COMPOSITION DE L'UNITE	Z	PRINCIPALES ESPECES LIGNEUSES DE L'ETAGE DOMINANT	VOLUMES BRUTS (m3/ha)	VOLUMES MOYENS DE L'UC (m3/ha)	UNITES MORPHO-PEDO (UM)
P 41 : Basses collines et basses croupes cuirassées.	400 à 600	P41.1	Steppe arbustive lâche.	100	Pterocarpus lucens Acacia raddiana Acacia seyal	≤ 5	1111	31 32
	600 à 800	P41.2	Savane ou steppe arborée. arbustive.	100	Pterocarpus lucens Combretum micranthum Bombax costatum	10 - 20	15	31 32
	800 à 1000	P41.3	Savane boisée ou bowal arboré.	70	Pterocarpus spp Lannea microcarpa Bombax costatum	15 - 20	18	31
			Bowal nu.	15	Combretum spp Lannea microcarpa	≤ 10		32
			Forêt claire.	15	Isobertia doka Pterocarpus erinaceus Lannea acida	40 - 50		
	1000 à 1200	P41.4	Savane boisée ou bowal arboré.	70	Pterocarpus spp Lannea microcarpa Bombax costatum	15 - 30	23	31
			Bowal nu.	15	Combretum spp Lannea microcarpa	≤ 10		32
			Forêt claire.	15	Isobertia doka Pterocarpus erinaceus Lannea acida	50 - 60		
	1200 et +	P41.5	Savane boisée ou bowal arboré.	60	Pterocarpus spp Lannea microcarpa Bombax costatum	25 - 30	35	31
			Bowal nu.	15	Combretum spp Lannea microcarpa	≤ 10		32
			Forêt claire.	25	Isobertia doka Pterocarpus erinaceus Lannea acida	60 - 80		
P 42 : Basses collines, basses croupes et glacis carapacés.	< 600	P42.0.1	Savane arborée.	85	Pterocarpus lucens Anogeissus leiocarpus Bombax costatum	10 - 15	10	33
			Bowal nu. Glacis de dénudation	15	Combretum spp Lannea microcarpa	≤ 5		34
	600 à 800	P42.2	Savane arborée.	85	Pterocarpus lucens Anogeissus leiocarpus Bombax costatum	10 - 20	13	33
			Bowal nu. Glacis de dénudation	15	Combretum spp Lannea microcarpa	≤ 5		34
	800 à 1000	P42.3	Savane arborée, rarement savane boisée.	90	Lannea spp Sterculia setigera Bombax costatum	10 - 20	15	33
			Glacis de dénudation Bowal nu (rare).	10	Pterocarpus lucens Combretum micranthum Boscia spp	≤ 5		34
	1000 à 1200 et +	P42.4,5	Savane arborée, rarement boisée. Savane verger.	90	Lannea spp Sterculia setigera Bombax costatum	15 - 20	18	33
			Glacis de dénudation Bowal nu (rare).	10	Pterocarpus lucens Combretum micranthum Boscia spp	≤ 5		34

PAYSAGES VEGETAUX ASSOCIES AU(X) :	PLUVIOMETRIES (mm/an)	UNITES CARTOGRAPHIQUES (UC)	COMPOSITION DE L'UNITE	Z	PRINCIPALES ESPECES LIGNEUSES DE L'ETAGE DOMINANT	VOLUMES BRUTS (m3/ha)	VOLUMES MOYENS DE L'UC (m3/ha)	UNITES MORPHO-FEDO (UH)
P 43 et P 44 Vieilles surfaces d'aplanissement mollement ondulées.	800 à 1200	P43.3,4	Savane verger.	180	Vitellaria paradoxa Parkia biglobosa	15 - 30	20	35
			Savane boisée.	15	Bombax costatum Pterocarpus erinaceus Sterculia setigera	15 - 25		
			Bowl nu.	15	Combretum spp	≤ 10		
	1200 et +	P43.5	Savane verger.	170	Vitellaria paradoxa Parkia biglobosa	20 - 35	30	35
			Savane boisée. Forêt claire.	25	Bombax costatum Pterocarpus erinaceus Isobrerlinia doka	30 - 50		
			Bowl nu.	15	Combretum spp	≤ 10		
	800 à 1200	P44.3,4	D c Savane boisée.	90	Bombax costatum Pterocarpus erinaceus Sterculia setigera	15 - 25	20	35
			Bowl nu.	10	Combretum spp	≤ 10		
	1200 et +	P44.5	D c Savane boisée. Forêt claire.	95	Bombax costatum Pterocarpus erinaceus Isobrerlinia doka	20 - 55	35	35
			Bowl nu.	15	Combretum spp	≤ 10		
P 45 : Basses collines et bas plateaux à cuirassés ou gravillonnaires avec voile ou recouvrement sableux.	< 800	P45.0/2	Steppe arbustive lâche.	100	Pterocarpus lucens Combretum micranthum Boscia senegalensis	5 - 10	7	51 52 53 54

PAYSAGES VEGETAUX ASSOCIES AU(X) :	PLUVIOMETRIES (mm/an)	UNITES CARTOGRAPHIQUES (UC)	COMPOSITION DE L'UNITE	%	PRINCIPALES ESPECES LIGNEUSES DE L'ETAGE DOMINANT	VOLUMES BRUTS (m3/ha)	VOLUMES MOYENS DE L'UC (m3/ha)	UNITES MORPHO-PEDO (UP)
P 51 et P 52 Reliefs vigoureux de buttes, collines, cuirassées ou non et de plateaux tabulaires fossilisés par une cuirasse.	400 à 800	P51.1,2	Savane arborée ou arbustive.	90	<i>Pterocarpus lucens</i> <i>Sclerocarya birrea</i> <i>Sterculia setigera</i>	10 - 20	15	43 - 44
			Glacis de dénudation Roche à nue.	10	<i>Combretum</i> spp <i>Pterocarpus lucens</i> <i>Boscia</i> spp	≤ 5		46 - 47
	800 à 1000	P51.3	Savane boisée ou bowal arboré.	90	<i>Pterocarpus erinaceus</i> <i>Bombax costatum</i> <i>Lannea</i> spp	20 - 25	20	43 - 44
			Formation de chaos gréseux.	5	<i>Ficus abutilifolia</i> <i>Pterocarpus lucens</i>	≤ 10		46 - 47
			Forêt claire.	5	<i>Anogeissus leiocarpus</i> <i>Pterocarpus erinaceus</i> <i>Cordia pinnata</i> <i>Bombax costatum</i>	40 - 50		46 - 47
	1000 à 1200	P51.4	Savane boisée ou forêt claire.	80	<i>Pterocarpus erinaceus</i> <i>Isoberrlinia doka</i> <i>Lannea acida</i>	30 - 40	25	43 - 44
			Bowal nu de versant.	15	<i>Combretum</i> spp <i>Pterocarpus lucens</i>	≤ 10		46 - 47
			Forêt dense, sèche.	≤ 2	<i>Guibourtia copallifera</i>	####		46 - 47
			Formation hygrophile	≤ 3	<i>Berlinia grandifolia</i> <i>Daniellia oliveri</i>	####		46 - 47
	1200 et +	P51.5	Savane boisée ou forêt claire.	80	<i>Pterocarpus erinaceus</i> <i>Isoberrlinia doka</i> <i>Lannea acida</i>	35 - 55	32	43 - 44
			Bowal nu de versant. Savane boisée.	15	<i>Combretum</i> spp <i>Pterocarpus lucens</i>	≤ 10		46 - 47
			Formation hygrophile	5	<i>Berlinia grandifolia</i> <i>Daniellia oliveri</i>	####		46 - 47
	600 à 1200	P52.2/4	Bowal nu de sommet.	70	<i>Combretum</i> spp	≤ 10	6	42
			Bowal arboré de sommet.	30	<i>Lannea microcarpa</i> <i>Pterocarpus erinaceus</i> <i>Hexalobus monopetalus</i>	15 - 30		41
	1200 et +	P52.5	Bowal nu de sommet.	80	<i>Combretum</i> spp	≤ 10	10	42
			Bowal arboré de sommet.	20	<i>Lannea microcarpa</i> <i>Pterocarpus erinaceus</i> <i>Hexalobus monopetalus</i>	25 - 35		41
	800 à 1000	P53.3	Forêt claire ou savane boisée.	100	<i>Bombax costatum</i> <i>Pterocarpus erinaceus</i> <i>Burkea africana</i>	30 - 40	35	45
	1000 à 1200 et +	P53.4,5	Forêt claire ou savane boisée.	100	<i>Isoberrlinia doka</i> <i>Pterocarpus erinaceus</i> <i>Burkea africana</i>	30 - 40	35	45

(suite)

PAYSAGE-VEGETAUX ASSOCIES AU(1) :	PLUVIOMETRIES (mm/an)	UNITES CARTOGRAPHIQUES (UC)	COMPOSITION DE L'UNITE	%	PRINCIPALES ESPECES LIGNEUSES DE L'ETAGE DOMINANT	VOLUMES BRUTS (m3/ha)	VOLUMES MOYENS DE L'UC (m3/ha)	UNITES MORPHO-PEDO (UPI)
P 61 Vieux dépôts sableux ou sablo-limoneux sur formes alluviales anciennes.	< 600	P61.0/1	Savane arborée sur sol non hydromorphe.	85	Combretum glutinosum Pterocarpus lucens Combretum spp	5 - 10	9	61
			Savane arborée sur sol affecté par une hydromorphie de profondeur ou de surface.	15	Anogeissus leiocarpus Combretum spp Acacia seyal	10 - 20		62
				11	Mytragina inermis Ziziphus mauritiana Acacia spp	30 - 50		
	600 à 1000	P61.2,3	Savane arborée sur sol non hydromorphe.	65	Combretum glutinosum Pterocarpus lucens Combretum spp	10 - 20	16	61
			Savane arborée sur sol affecté par une hydromorphie de profondeur ou de surface.	30	Anogeissus leiocarpus Combretum spp Acacia seyal	15 - 20		62
				15	Mytragina inermis Ziziphus mauritiana Acacia spp	30 - 50		
P 71 Systèmes dunaires remaniés ou non.	< 600	P71.0/1	Savane arbustive.	100	Combretum glutinosum Prosopis africana Sterculia setigera	18	5	63 64 65
	600 à 800	P71.2	Savane arbustive ou arborée.	90	Combretum glutinosum Prosopis africana Sterculia setigera	8 - 15	10	63 64
				10	Sclerocarya birrea Ziziphus mauritiana Acacia spp	30		65
Dépôts éoliens sur système de paléovallées. P 81	400 à 800	P81.1,2	Savane arbustive.	100	Combretum glutinosum Brewia bicolor Acacia macrostachya	5 - 15	8	66



Cultures ou jachères récentes.

Volume ligneux négligeable et/ou conservation impérative du couvert ligneux.



Ville ou village important.

DIVISIONS ADMINISTRATIVES :

Limite d'Etat.
Limite de Région.
Limite de Cercle.
Limite d'Arrondissement.
Limite de Forêt Classée.

34. Cartographie de la végétation - Légendes particulières

Cartographie de la végétation

Les tableaux qui suivent décrivent des unités cartographiées qui sont spécifiques à certaines régions naturelles du Mali (principalement partie Centre Est et Est du pays)

MOUJ - EST, AKLE AZAGUAD

PAYSAGES VEGETAUX ASSOCIES AU(X) :	PLUVIOMETRIES (mm/an)	UNITES CARTOGRAPHIQUES (UC)	COMPOSITION DE L'UNITE	%	PRINCIPALES ESPECES LIGNEUSES DE L'ETAGE DOMINANT	VOLUMES BRUTS (m3/ha)	VOLUMES MOYENS DE L'UC (m3/ha)	UNITES MORPHO-PEDO (UN)
Basses collines et bas plateaux à recouvrement sableux.	< 400	PA 45.0	Steppe arbustive.	100	Maerua spp Boscia senegalensis Acacia nilotica	≈ 1	1	51A
reg.	< 400	PA 53.0	Steppe arbustive.	100	Acacia seyal Acacia nilotica Boscia spp	≤ 5	2	47Ar
Relief résiduel.	< 400	PA 54.0	Steppe arbustive.	100	Boscia senegalensis Acacia erenbergiana Maerua spp	< 5	2	47A
Dépôts sableux anciens.	< 400	PA 61.0	Steppe arbustive.	100	Acacia spp Balanites aegyptiaca Boscia senegalensis	≤ 5	2	62A
Dunes fixées et dépôts sableux anciens.	< 400	PA 71.0	Steppe arbustive.	100	Leptadenia spp Acacia spp Boscia senegalensis	≤ 5	2	63A 65A

DELTA NIGER

PAYSAGES VEGETAUX ASSOCIES AU(X) :		PLUVIOMETRIES (mm/an)	UNITES CARTOGRAPHIQUES (UC)		COMPOSITION DE L'UNITE	%	PRINCIPALES ESPECES LIGNEUSES DE L'ETAGE DOMINANT	VOLUMES BRUTS (m3/ha)	VOLUMES MOYENS DE L'UC (m3/ha)	UNITES MORPHO-PEDO (UM)
DEPOTS ALLUVIAUX DU DELTA NIGER	DELTA	< 600	P91.0,1	Savane arborée.	50	Combretum micranthum Anogeissus leiocarpus Mitragyna inermis Acacia seyal	10 - 40	16	14d	
				Savane arborée ou arbustive.	50	Combretum glutinosum Vitellaria paradoxa Piliostigma reticulatum	< 10			
		600 à 800	P91.2	Savane arborée.	50	Combretum micranthum Anogeissus leiocarpus Mitragyna inermis Acacia seyal	20 - 50	25	14d	
				Savane arborée ou arbustive.	50	Combretum glutinosum Vitellaria paradoxa Piliostigma reticulatum	5 - 15			
	MORT	< 600	P92.0,1	Savane arborée claire.	50	Anogeissus leiocarpus Acacia seyal Balanites aegyptiaca	10 - 20	15	15d	
				Savane arbustive.	50	Anogeissus leiocarpus Acacia seyal Dichrostachys cinerea	10 - 20		16d	
		600 à 800	P92.2	Savane arborée claire.	50	Anogeissus leiocarpus Acacia seyal Balanites aegyptiaca	15 - 30	25	15d	
				Savane arbustive.	50	Anogeissus leiocarpus Acacia seyal Dichrostachys cinerea	15 - 30		16d	
	DELTA	< 800	P93.0/2	Savane arborée.	100	Guiera senegalensis Piliostigma reticulatum Sclerocarya birrea Grewia bicolor	0 - 25	15	12d	
		< 800	P96.0/2	Savane arbustive. Peuplement hétérogène.	100	Combretum glutinosum Grewia flavescens	10 - 15	12	11d	
		< 800	P94.0/2	Savane arborée ou arbustive.	100	Combretum spp Anogeissus leiocarpus Acacia spp	10 - 30	20	17dv	
		400 à 800	P95.1,2	Savane arborée. Peuplement hétérogène.	100	Acacia spp Dichrostachys cinerea Anogeissus leiocarpus	10 - 20	15	13dv	
	DUTRA VIF	Plaines et cuvettes alluviales inondables.	400 à 800	P03.1,2	Formation hygrophile herbacée.	100	Pas de ligneux	####	####	13v
			400 à 800	P04.1,2	Savane arbustive très dispersée. Régénération d'espèces pionnières.	100	Guiera senegalensis Piliostigma reticulatum Calotropis procera	≈ 0	####	14v
			400 à 800	P05.1,2	Mosaïque formation hygrophile herbacée, savane arbustive très lâche.	100	Guiera senegalensis Piliostigma reticulatum Acacia seyal	≤ 5	3	15v
			400 à 600	P06.1	Formation hygrophile herbacée avec par endroits taches de régénération ligneux	100	Acacia seyal Piliostigma reticulatum	≈ 0	####	16v
MARES PERMANENTES										

ZONE LACUSTRE

PAYSAGES VEGETAUX ASSOCIES AU(X) :	PLUVIOMETRIES (mm/an)	UNITES CARTOGRAPHIQUES (UC)	COMPOSITION DE L'UNITE	%	PRINCIPALES ESPECES LIGNEUSES DE L'ETAGE DOMINANT	VOLUMES BRUTS (m3/ha)	VOLUMES MOYENS DE L'UC (m3/ha)	UNITES MORPHO-PEDO (UM)
Alluvions récentes.	< 600	PL 11.0 PL 11.1	Steppe arborée.	100	Leptadenia spp Boscia senegalensis Ziziphus mauritiana	≤ 2	1	11L
Alluvions récentes.	< 600	PL 12.0 PL 12.1	Steppe arborée.	100	Hyphaene thebaica Acacia seyal Boscia senegalensis	≤ 15	7	12L
Alluvions récentes.	< 600	PL 13.0 PL 13.1	Steppe arborée.	100	Diospyros aespiliformis Balanites aegyptiaca Acacia seyal	2 - 20	11	13L 14L
Dunes fixées et dépôts sableux anciens.	< 600	PL 61.0 PL 61.1	Steppe arborée.	100	Hyphaene thebaica Acacia spp Balanites aegyptiaca	2 - 20	11	62L
Systèmes dunaires remaniés ou non.	< 400	PL 71.0	Savane arbustive.	100	Combretum glutinosum Guiera senegalensis Sclerocarya birrea Sterculia setigera	≤ 5	2	63L

MARES PERMANENTES

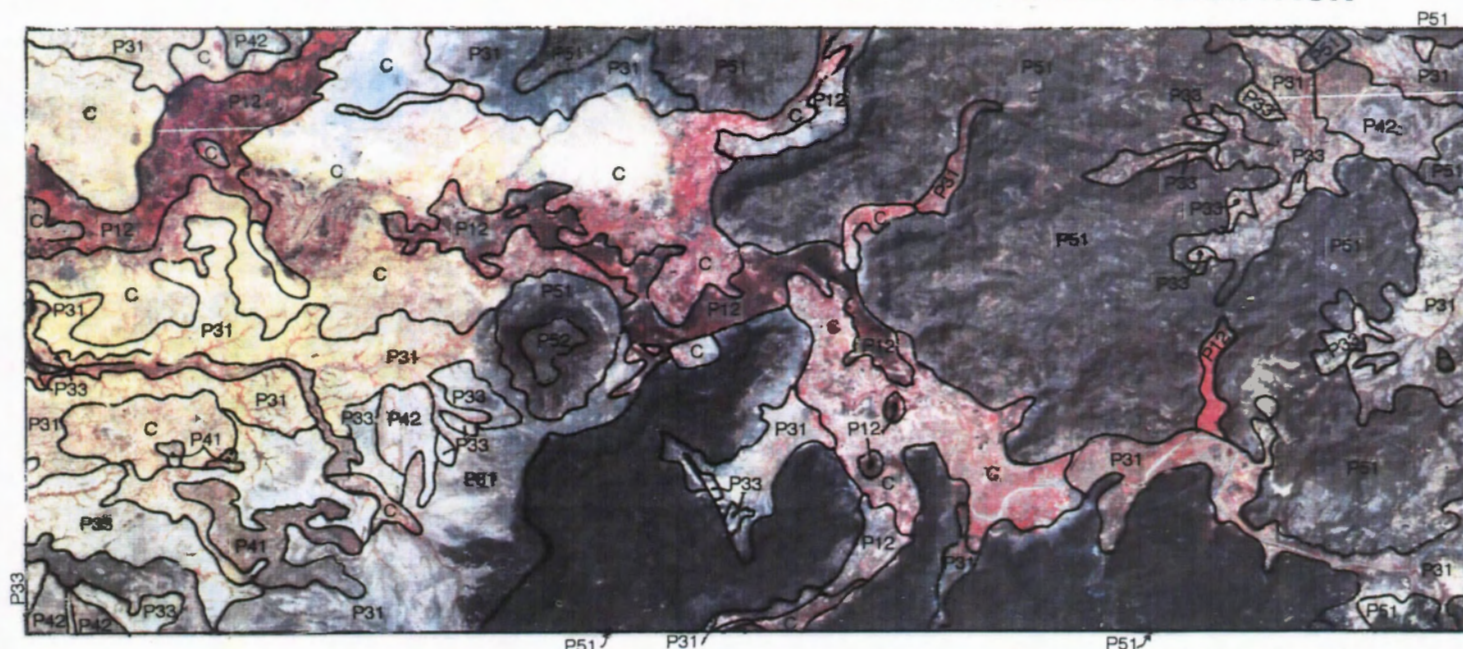
GOURMA

PAYSAGES VEGETAUX ASSOCIES AU(X) :	PLUVIOMETRIES (mm/an)	UNITES CARTOGRAPHIQUES (UC)	COMPOSITION DE L'UNITE	%	PRINCIPALES ESPECES LIGNEUSES DE L'ETAGE DOMINANT	VOLUMES BRUTS (m3/ha)	VOLUMES MOYENS DE L'UC (m3/ha)	UNITES MORPHO-PEDO (UM)
Vallées étroites et sinu-euses.	400 à 600	PG 21.1	Frange ripicole de type sahélien. Prairie hydrophile.	100	Anogeissus leiocarpus Boscia senegalensis Dalbergia melanoxylon Pterocarpus lucens	2 - 15	8	146
Glacis d'épandage.	400 à 600	PG 31.1	Savane arbustive. Dégradation naturelle.	100	Combretum micranthum Pterocarpus lucens Boscia senegalensis Acacia albida	2 - 10	6	216D 216 216C
Basses collines et basses croupes cuirassées.	400 à 600	PG 41.1	Savane arbustive lâ-che.	100	Combretum micranthum Pterocarpus lucens Anogeissus leiocarpus	≤ 5	####	316
Basses collines, basses croupes et glacis carapacés.	400 à 600	PG 42.1	Savane arbustive.	100	Combretum micranthum Pterocarpus lucens Boscia senegalensis	≤ 10	####	336
Plaines alluviales.	< 600	PG 61.0 PG 61.1	Savane arbustive.	100	Combretum micranthum Guiera senegalensis Boscia senegalensis	≤ 10	####	616 626
Systèmes dunaires remaniés ou non.	< 600	PG 71.0 PG 71.1	Savane arbustive.	100	Combretum glutinosum Guiera senegalensis Sclerocarya birrea Sterculia setigera	≤ 5	2	636 646

BOUCLE DU NIGER

PAYSAGES VEGETAUX ASSOCIES AU(X) :	PLUVIOMETRIES (mm/an)	UNITES CARTOGRAPHIQUES (UC)	COMPOSITION DE L'UNITE	%	PRINCIPALES ESPECES LIGNEUSES ET HERBEUSES DE L'ETAGE DOMINANT	UNITES MORPHO-PEDO (UM)
Alluvions inondables du Niger	< 400	PN 11.0	Prairie hygrophile.	100	Vetiveria nigriflora Panicum anabaptistum Oryza longistaminata Echinochloa stagnina	11N
	< 400	PN 12.0	Complexe de prairie hygrophile et de savane arbustive.	100	Selon la position topographique: Vetiver nigriflora Piliostigma reticulatum	12N
Alluvions érodées du Niger.	< 400	PN 13.0	Savane arbustive.	100	Piliostigma reticulatum Zizyphus mauritiana Balanites aegyptiaca Brewia bicolor	14N 15N
Système de mares temporaires et des anciens axes de drainage.	< 400	PN 14.0	Fourré ou formation boisée hygrophile.	100	Acacia nilotica Zizyphus mauritiana Piliostigma reticulatum Guiera senegalensis	M 67N
	< 400	PN 15.0	Savane arborée.	100	Acacia seyal Piliostigma reticulatum Zizyphus mauritiana Combretum micranthum	16N
Basses collines cuirassées.	< 400	PN 16.0	Steppe arborée.	100	Pterocarpus lucens Boscia senegalensis Combretum micranthum Brewia bicolor	31N
PCS " Pavement désertique "	< 400	PN 17.0	Zone dénudée.	100	Rares : Acacia ehrenbergiana	47N
Sable pénéplainé et interdunes.	< 400	PN 61.0	Steppe arbustive.	100	Acacia ehrenbergiana Acacia raddiana Balanites aegyptiaca	52N
Champs de dunes réticulées et cordons dunaires.	< 400	PN 71.0	Steppe arbustive ouverte.	100	Leptadenia pyrotechnica Acacia raddiana	63N 65N
Dépôt éolien sur système de paléovallées.	< 400	PN 81.0	Savane arborée.	100	Balanites aegyptiaca Acacia seyal Acacia adansonii Zizyphus mauritiana	66N
Complexes des dépôts éoliens divers et du reg.	< 400	PNC 1.0	Steppe arbustive.	75	Acacia ehrenbergiana Acacia raddiana	62N
			Steppe arborée.	25	Pterocarpus lucens Boscia senegalensis	31N
	< 400	PNC 2.0	Steppe arbustive.	75	Acacia ehrenbergiana Acacia raddiana	62N
			Zone dénudée.	25	Rares graminées	47N
	< 400	PNC 3.0	Zone dénudée.	75	Rares graminées Acacia ehrenbergiana	47N
			Steppe arbustive.	25	Acacia raddiana	62N
	< 400	PNC 4.0	Steppe arbustive.	75	Leptadenia pyrotechnica Acacia raddiana	63N
			Zone dénudée.	25	Rares graminées	47N

EXTRAIT DE LA CARTOGRAPHIE DES PAYSAGES VEGETAUX



KJ 34-320 28/11/87 SUR DOLERITE, GLACIS, DEPOTS ALLUVIAUX INONDABLES

P12	Prairie hygrophile	P41	Savane ou steppe arborée, arbustive, bowé
P21	Forêt galerie	P42	Savane arboréen glacis de dénudation
P31	Savane arborée ou savane verger	P51	Savane boisée, arborée, forêt claire
P33	Formation arbustive lâche	P52	Bowé de sommet
		C	Cultures et jachères récentes



KJ 42-328 21/2/87 SUD MALI

P12	Prairie hygrophile	P41	Savane boisée, bowé, bowé arboré
P21	Forêt galerie	P43	Savane verger, savane boisée
P31	Savane boisée, forêt classée	C	Cultures et jachères récentes

EXTRAIT DE LA CARTOGRAPHIE DES PAYSAGES VEGETAUX



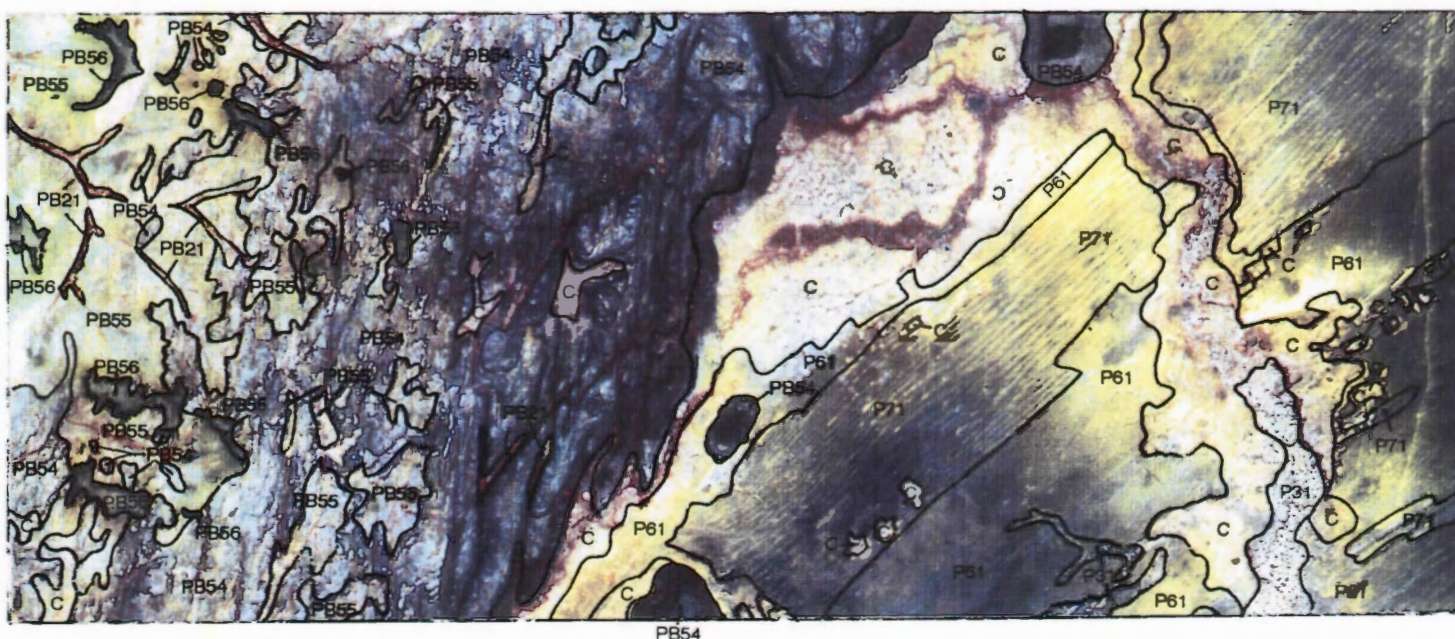
KJ 47-319 21/10/89 DELTA CENTRAL ET ZONE LACUSTRE

DELTA CENTRAL

P03	Formation hygrophile herbacée Inondation prolongée
C	Cultures et jachères récentes

ZONE LACUSTRE

PL11	Steppe arbustive, inondation périodique sévère
PL12	Steppe arborée, inondation temporaire
PL13	Steppe arborée, risques d'inondation
PL61	Steppe arborée, cordons dunaires anciens



KJ 49-321 14/11/87 PLATEAU DE BANDIAGARA, SENO / GONDO

PLATEAU DE BANDIAGARA

PB21	Savane arbustive
PB54	Bowé typiques
PB55	Savane ou steppe arbustive
PB56	Savane arbustive "tigrée"

SENO - GONDO

P31	Savane arbustive
P61	Savane arborée
P71	Savane arbustive à arborée
C	Cultures et jachères récentes

Chapitre 4

CONTROLE DE TERRAIN
TRAITEMENT DES DONNEES

41 Les différents niveaux de stratification de l'inventaire

L'estimation de la ressource ligneuse réalisée au niveau du Cercle et de ses Arrondissements repose sur la démarche suivante :

411 Constitution de données de référence (première phase du projet 1985-1987)

- stratification A

La stratification préliminaire du Mali basée sur la documentation existante (atlas PIRT) et aboutissant à une carte au 1,5 million délimitant :

- les domaines bioclimatiques
- les principaux types de milieu physique
- les zones les plus fortement marquées par l'intervention humaine.

Cette stratification préliminaire a débouché sur le choix de 16 zones-tests représentatives cartographiées au 1/50 000° et inventoriées sur le terrain.

- stratification B

Définition de deux méthodes d'inventaire et d'estimation des ressources et délimitation des secteurs sur lesquelles elles sont applicables.

Méthode 1 : applicable au nord de l'isohyète 800 mm

Méthode 2 : applicable au sud de l'isohyète 800 mm

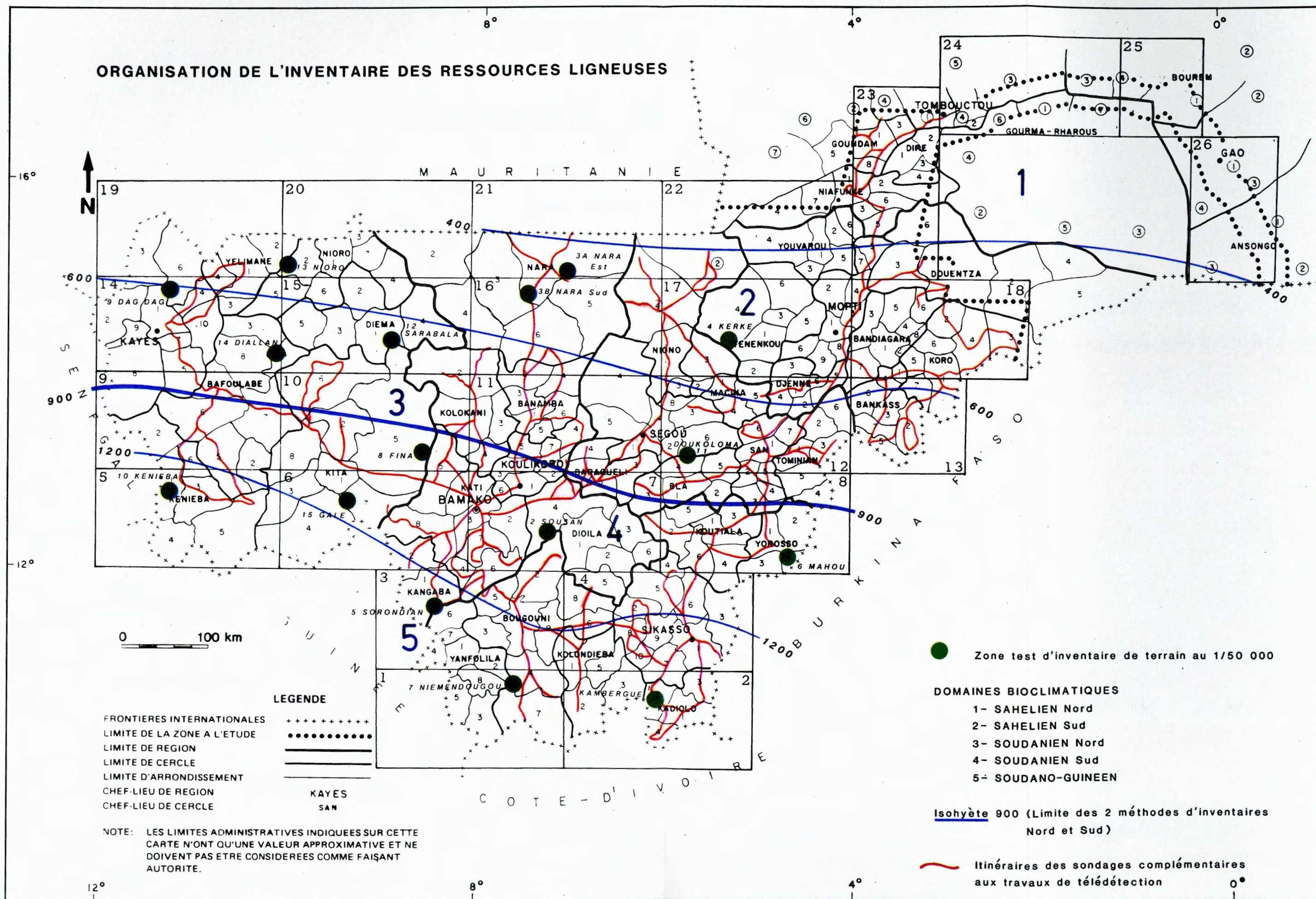
- stratification C

Délimitation de régions comparables aux zones test étudiées.

Sur ces régions seront appliqués :

- a) les pourcentages relatifs des formations végétales identifiées au 1/50 000° (zones-tests) mais non séparables par télédétection
- b) le contenu floristique et les volumes moyens correspondants à ces formations végétales
- c) les normes et ratios à utiliser pour les sondages de terrain de la deuxième phase de l'inventaire.

ORGANISATION DE L'INVENTAIRE DES RESSOURCES LIGNEUSES



412 Généralisation de l'inventaire

- stratification D

Ce niveau de stratification correspond au découpage administratif, du Cercle et de ses Arrondissements. Chaque Cercle a constitué une unité de travail (cartographie, contrôles sur le terrain) et de présentation des données quantitatives.

- stratification E

Elle est basée sur la délimitation par télédétection d'unités définies en termes de critère morphopédologique représentatif des modes de distribution de la végétation et appelés paysages végétaux.

Sur la base du zonage bioclimatique ces paysages végétaux ont été découpés en unités cartographiques qui constituent la plus petite unité de stratification représentée de façon exhaustive sur l'ensemble de l'inventaire (voir stratification D).

- stratification F

Correspond à un découpage en domaines bioclimatiques reposant sur les isohyètes 1922-1988 :

200 - 400 mm	Sahélien nord
400 - 600 mm	Sahélien sud
600 - 800 mm	Soudanien nord 1
800 - 1000 mm	Soudanien transition sud
1000 - 1200 mm	Soudanien sud
> 1200 mm	Soudano-guinéen

Cette stratification est utilisée :

- . sur le plan spatial pour subdiviser les unités de paysages végétaux et les unités cartographiques délimitées par télédétection
- . sur le plan quantitatif pour affecter des valeurs de volume, de distribution des essences et d'estimation de coefficient d'accroissement annuel applicables aux unités cartographiques et à leur composantes non cartographiables à l'échelle du 1/200 000°.

Ces composantes sont définies en pourcentages moyens à l'intérieur de chaque unité cartographique de superficie et en contenu floristique ligneux ainsi qu'en volume correspondant.

Ce niveau de stratification n'a pas été cartographié mais utilisé uniquement pour les estimations quantitatives.

413 Description d'une unité cartographique

Prenons l'exemple de l'unité codée P. 35 les critères de définition, les niveaux de stratification et de source d'information seront :

Présentation des données quantitatives	Unité de paysage végétal	Domaine bioclimatique et unité cartographique	Composantes de l'unité	Volume moyen/ha
Cercle de BOUGOUNI Arrondissement de MANANKORO Méthode d'inventaire appliquée au sud de l'isohyète 800 mm	P 43. Surface d'aplanissement sols ferrallitiques gravillonnaires	P 43.5 Domaine Soudano-guinéen 5 (P > 1 200 mm)	Cartographique et % de superficie. Savanes vergers 70%	15m3
			Forêts claires et savanes boisées : 25%	25m3
			Cuirasses dénudées 5%	5m3
			Volume moyen de l'unité dans l'arrondissement de MANANKORO 122.300 m3	
N I V E A U D E S T R A T I F I C A T I O N				
B et D	E	F	C	B+D+E+F+C
S O U R C E I N F O R M A T I O N				
Découpage administratif isohyètes 1922 - 1985	Images satellites Télédétection visuelle. ----- Localement Test Photo Interprétation cartes IGN	Isohyètes 1922 - 1985 ----- surface de l'unité obtenue par planimétrage	Cartographie de la zone test de référence n°7 (Nienendougou) contrôle par transect 2ème phase	Inventaire zone test 1ere phase ----- inventaire de contrôle 2ème phase

42 Méthodes d'inventaire complémentaire de terrain

421 Données acquises lors de la première phase de l'inventaire (études des zones test de référence).

Le rapport technique de la première phase décrit de façon détaillée la méthode mise en oeuvre et les résultats obtenus. On trouvera, par ailleurs, de nombreuses données chiffrées d'inventaire présentées dans les 16 notices de zone rédigées pour chacune des zones-tests étudiées.

422 Contrôles de terrain de la deuxième phase de l'inventaire

- a) Objectifs : Compléter les données de référence acquises sur les zones test à l'aide d'itinéraires de contrôle et de sondages de terrain localisés entre les zones test. (cf carte page 61).

Il s'agissait donc de mettre au point une technique plus "légère" afin de fournir une "vérité-terrain" en appui à l'interprétation des images du satellite SPOT.

Les exigences de ces contrôles terrain devaient :

- être rapides,
- être fiables et opérationnels, afin de ne pas laisser de biais subjectif dû aux différents opérateurs possibles,
- permettre de contrôler de grandes surfaces, même de manière extensive,
- être compatibles avec le budget de l'opération.

b) Organisation des sondages

Le document issu de l'interprétation préliminaire des images satellites a été utilisé pour le choix des itinéraires de contrôle.

Ces itinéraires sont :

- a) soit des itinéraires de contrôle systématique des unités cartographiées
- b) soit des itinéraires permettant la description des unités cartographiques posant un problème particulier d'interprétation sur les images satellites.

Les sondages de terrain consistent à recueillir des informations qualitatives concernant les composantes des unités cartographiques non délimitées sur les images satellites, ainsi que des séquences de végétation observées sur le terrain.

L'expérience du personnel de contrôle terrain, acquise pendant 2 ans au cours de l'inventaire de la première phase, a été un atout majeur pour la précision des informations récoltées.

Les itinéraires choisis correspondent en général à des pistes praticables. Les axes de grandes circulation ont été considéré comme peu représentatifs car plus fortement perturbés par les activités humaines, en particulier la collecte du bois de chauffe.

Le choix des points de sondage se situe à deux niveaux :

- un niveau orienté avec le choix (à une distance variable de la piste de contrôle) d'une unité cartographique à renseigner. Dans ce cas le sondage est localisé à partir de la minute d'interprétation de l'image à l'échelle du 1/200 000°.
- un niveau systématique correspondant à une parcelle à sonder localisée à 400 m environ du point prédéterminé sur la piste choisie comme itinéraire de contrôle et dans un axe de direction faisant 90° avec la direction générale de cette piste.

Ces sondages supplémentaires comparés à ceux obtenus sur les zones test et localisés "en pleine nature" ont montré que l'influence sur l'environnement des pistes choisies pouvaient être considérée comme négligeable pour ce type d'inventaire.

c) Sondages rapides : méthodes utilisées

Compte tenu des différences physionomiques entre les formations de type sahélien et celle de type soudanien (ou soudano-guinéen), 2 types de démarche ont été utilisés lors de la première phase.

L'une adaptée aux zones situées au nord de l'isohyète 900 mm, l'autre applicable aux formations végétales localisées au sud de cette isohyète. De la même manière la méthodologie de sondages rapides au sud et au nord de l'isohyète 900 mm a fait l'objet de 2 protocoles différents.

- Au sud de l'isohyète 900 mm (domaines Soudanien-sud et Soudano-guinéen)

A la fin de la première phase nous disposons des résultats suivants :

- des tarifs de cubage, individuels et de peuplement,
- des unités primaires d'inventaire comptées et mesurées de manière détaillée,
- des estimations de volume sur ces différentes unités primaires.

Nous avons alors regroupé les unités primaires par grandes formations végétales et fait une estimation de volume au niveau de celles-ci pour chaque zone test de l'inventaire.

Cette méthode a donné de bons résultats au niveau des 16 zones d'étude, représentant au total 600 000 ha, mais n'est plus applicable dans le cadre présent (superficies concernées 20 fois plus grandes).

Aussi nous sommes repartis de l'information de base, la plus petite possible, à savoir la parcelle de comptage de 1 250 m² sur laquelle nous avons appliqué les tarifs de cubage. Nous obtenons ainsi une évaluation d'un volume ligneux pour chaque parcelle.

Pour diminuer les variations locales (variances élevées) nous avons regroupé les parcelles en grappes de 4 parcelles (totalisant une superficie de 0,5 ha). Ce regroupement nous a permis d'éliminer une bonne part de la variation locale due à l'hétérogénéité de la répartition spatiale des végétaux.

Ceci permet d'autre part de mieux appréhender la végétation grâce à une "compacité" ligneuse plus grande.

Remarque : Des groupements à 6 - 8 parcelles ont aussi été essayés sans gain notable.

Nous obtenons donc un certain nombre de n uplets, formés d'une variable à expliquer et de $n - 1$ variables explicatives. Les variables explicatives retenues à priori étaient les suivantes :

Ni : Effectif des tiges de la classe de circonférence i
 Gi : Surface terrière des tiges de la classe de circonférence i
 H : Hauteur dominante

La variable à expliquer étant bien sûr le volume.

Après plusieurs essais de régression multiple et en ne perdant pas de vue les objectifs. (en particulier la rapidité) nous sommes arrivés aux tarifs de peuplement suivants :

- Domaine Soudano-guinéen :

$$V = -1,18479 + 0,02629 N_1 + 0,12760 N_2 + 0,43304 N_3 + 0,94207 G_4$$

$$R^2 = 0,988 \quad Sr = 1,603 \quad n = 415$$

- Domaine Soudanien-sud :

$$V = 0,17317 + 0,02181 N_1 + 0,11117 N_2 + 0,35019 N_3 + 0,95022 G_4$$

$$R^2 = 0,984 \quad Sr = 1,368 \quad n = 521$$

R^2 : Coefficient de détermination

Sr : Ecart type résiduel

n : Nombre de grappes de 4 parcelles

avec :

V : Volume en m^3 pour une grappe de 4 parcelles

N1 : Effectif des tiges de circonférence à 1,30m comprise entre 22 et 39 cm

N2 : Effectif des tiges de circonférence à 1,30m comprise entre 40 et 69 cm

N3 : Effectif des tiges de circonférence à 1,30m comprise entre 70 et 99 cm

G4 : Somme des circonférences au carré des tiges de circonférence ≥ 100 cm
 (G4 est proportionnel à la surface terrière des types 100 cm)

Ces deux régressions sont non biaisées et très hautement significatives. De plus l'utilisation d'un simple comptage pour les petites tiges permet un gain de temps notable.

Elles ont donc été retenues pour la méthode des sondages rapides.

- Au nord de l'isohyète 900 mm (domaine Soudanien-nord et Sahélien-sud)

A la fin de la première phase nous disposons de résultats identiques à ceux des domaines situés au sud, mais obtenus à l'aide de mesures et surtout d'un procédé de dépouillement différent (voir à ce sujet le rapport Méthodologie et Synthèse de l'Inventaire).

Nous avons, dans un premier temps, essayé d'appliquer la même méthode que celle utilisée au sud de l'isohyète 900 mm, c'est-à-dire d'établir une relation entre le volume d'une grappe de 4 parcelles et les caractéristiques de ces parcelles. Malheureusement les résultats ont été décevants :

- Domaine Sahélien-sud : Aucune relation simple n'a pu être trouvée.
- Domaine Soudanien-nord :

$$V = 0,44373 + 0,10721 \text{ GF1} + 0,20019 \text{ GFA}$$

$$R^2 = 0,902 \quad \text{Sr} = 0,670 \quad n = 422$$

avec :

GFA : Somme des circonférences à la base élevée au carré pour des arbres à partir de 22 cm

GF1 : Somme des circonférences à la base au carré des faciés intermédiaires à partir de 22 cm

Cette relation est correcte mais elle ne tient pas compte des buissons ce qui nous paraît théoriquement gênant et de plus elle paraît biaisée pour les parcelles à fort pourcentage de petites tiges.

Aussi nous avons procédé de la manière suivante :

A partir des cubages (740 arbres cubés sur 10 espèces) disponibles pour les deux domaines bioclimatiques nous avons établi un tarif individuel :

pour toutes les essences à partir de 22 cm de circonférence à la base qui est de la forme :

$$V = 0,03879 - 0,33235 C_{\text{base}} + 0,83915 c_{\text{base}}^2$$

$$R^2 = 0,953 \quad \text{sr} = 0,127 \quad n = 725 \text{ arbres}$$

V : Volume en m³

C_{base} : circonférence à la base en m

Pourtant, la méthodologie de prise de mesure sur le terrain est modifiée et toutes les tiges de circonférence à la base supérieure ou égale à 22 cm sont mesurées individuellement même si elles appartiennent à un buisson. La distinction entre arbres, intermédiaire et buisson est tout de même conservée pour l'estimation des densités à l'hectare.

423 Réalisation pratique - Ratios

Réalisation sur le terrain, équipes, matériel

Cette méthode permet de tenir compte de tous les ligneux et en même temps de fournir des résultats cohérents avec la précédente ainsi qu'avec les résultats de la première phase.

A la suite de la pré-interprétation des images SPOT, une maquette

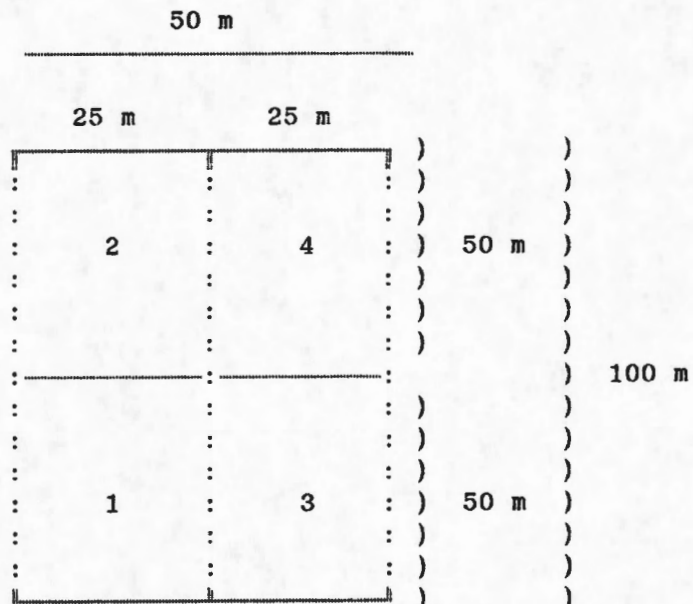
A la suite de la pré-interprétation des images SPOT, une maquette coloriée est réalisée.

C'est à partir de cette maquette qu'est choisie l'implantation des différents sondages rapides en fonction de :

- l'intérêt des différentes unités cartographiées,
- l'accessibilité.

Le plan de sondage est alors reporté sur la carte topographique IGN au 1/200 000 et l'équipe est envoyée sur le terrain munie de la carte et d'une notice explicative portant les kilomètres et les caractéristiques de mise en place des sondages (layon d'accès, azimuth, etc...).

L'unité de sondage est un rectangle de 0,5 ha (voir croquis ci-dessous) divisé en quatre parcelles :



L'équipe de terrain a été réduite au maximum, elle comporte :

- un ingénieur des Eaux et Forêts malien comme chef d'équipe, (plus de 5 ans d'expérience en inventaire)
- un chauffeur, un cuisinier, sept manoeuvres.

Remarques : Les sept manoeuvres ont reçu une formation leur permettant de se servir d'une boussole, d'un topofil et de faire des mesures.

Cette équipe réalise de 2 à 6 sondages par jour en fonction des difficultés locales de circulation, de l'éloignement des points de sondage, des aléas climatiques. 600 sondages ont été réalisés en 2ème et 3ème régions à raison de 4 sondages par jour en moyenne.

Ce ratio tient compte : des déplacements, des temps de repas, des imprévus (pannes de véhicules, maladies, etc...).

Nombre de points sondés par zones bioclimatiques

Zones bioclimatiques	Nombre de points sondés par Cercle		Total	Surface sondée en hectare
200 - 400mm 24 000 km ²	Tombouctou 5 Goundam. 33 Diré 3	Niafunké 24 Mopti. 8	73	36, 5
400 - 600mm 152 000 km ²	Yélimané 15 Kayes. 2 Mopti. 20 Niono. 53 Macina 40	Djenne 14 Bandiagara 19 Douentza 34 Koro 53 Bankass. 6	256	128
600 - 800mm 93 000 km ²	Nara 6 Macina 3 Koro 2 Bankass. 51 Tominian 12 San. 29	Ségou. 48 Banamba. 88 Koulikoro. 30 Kolokani 23 Kita 10 Kayes. 10 Barouéli 3	315	157, 5
800 - 1000mm 77 000 km ²	San. 19 Koulikoro. 40 Kolokani 20 Kita 14 Kayes. 3 Bafoulabé. 8 Kati 29	Diaïla 37 Barouéli 44 Bla. 29 Koutiala 38 Yorosso. 15	296	148
1000 - 1200mm 74 000 km ²	Bafoulabé. 6 Kita 16 Kati 200 Koutiala 5 Sikasso. 54 Diaïla 6	Bougouni 56 Kangaba. 27 Kéniéba. 7	377	188, 5
> 1200mm 60 000 km ²	Sikasso. 100 Bougouni 30 Kadiolo. 69 Kalondiéba 41	Kangaba. 4 Kéniéba. 19	263	131, 5

TOTAL 480 000 Km²

1 580

790

NOMBRE DE POINTS DE SONDES PAR CERCLE

Numéro	CERCLES	Nombres de sondage
1	Bandiagara	19
2	Bafoulabé	14
3	Banamba	88
4	Bankass	57
5	Barouéli	47
6	Bla	29
7	Bougouni	86
8	Diéma	--
9	Dioila	43
10	Diré	03
11	Djenne	14
12	Douentza	34
13	Goundam	33
14	Kadiolo	69
15	Kangaba	31
16	Kati	229
17	Kayes	15
18	Kéniéba	26
19	Kita	40
20	Kolokani	43
21	Kalondiéba	41
22	Koulikoro	70
23	Koutiala	43
24	Koro	55
25	Macina	43
26	Mopti	28
27	Nara	06
28	Niafunké	24
29	Niono	53

Numéro	CERCLES	Nombres de sondage
30	Nioro	--
31	San	48
32	Ségou	48
33	Sikasso	154
34	Tenenkou	--
35	Tombouctou	05
36	Tominian	12
37	Yanfolila	--
38	Yélimané	15
39	Yorosso	15
40	Youvarou	--

1 580

43 Estimation du taux de sondage

Les travaux réalisés lors de la première phase de l'inventaire sont résumés dans le tableau suivant :

		Nombre de zone test et surface totale (ha)	Nombre d'unité primaires	Surface sondée réelle	Taux de sondage réel %
Sahélien sud	4	114 165 ha	34	225 ha	0,20
Soudanien nord	4	157 025 ha	44	219 ha	0,14
Soudanien sud	4	163 670 ha	54	266 ha	0,16
Soudano guinéen	4	164 900 ha	49	291 ha	0,18
TOTAL	16	599 760 ha	185	1001 ha	0,17

Les travaux de terrain réalisés lors de la deuxième phase de l'inventaire ont porté sur 1 580 parcelles comptées en plein et mesurant chacune 0,5 ha (100 x 50 m).

Le taux de sondage est infime puisque seuls 790 hectares ont été comptés pour une superficie d'environ 480 000 km².

Il s'agit bien d'une cartographie quantifiée et non pas d'un inventaire forestier national classique.

Chapitre 5

TELEDETECTION ET CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION AGRICOLE DES TERRES

5 TELEDETECTION ET CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION AGRICOLE DES TERRES

51 Objectifs

La cartographie de l'utilisation agricole réalisée dans le cadre de cet inventaire avait pour objectifs :

a) la délimitation des espaces sur lesquels la végétation ligneuse est généralement fortement modifiée par l'homme soit par l'élimination définitive de certaines espèces (ex : dessouchage en zone de culture attelée) soit par la conservation préférentielle de certaines autres (Karité, Néré...). Le produit final donne un bilan complet sur l'ensemble de l'espace rural.

b) La cartographie et l'évaluation des surfaces agricoles fournissent une information susceptible d'intéresser des utilisateurs variés (vulgarisation agricole, organisation de la statistique agricole, développement régional, suivi des ressources et gestion de l'espace rural en général).

52 Méthodologie et limite de fiabilité de l'information

La définition de ces systèmes repose sur deux séries de critères :

. des critères de délimitation et d'identification des paysages agricoles basés sur les réponses spectrales des images SPOT (approche visuelle).

. des critères de contenu de ces systèmes, récoltés à partir de la documentation existante et des observations de terrain recueillies lors des contrôles nécessaires à l'inventaire des ressources ligneuses.

Cette étude n'avait pas pour objet la réalisation d'un travail de statistique agricole et n'en avait pas les moyens.

53 Principales caractéristiques des systèmes d'occupation agricole des terres cartographiés

531 Systèmes associés aux alluvions et zones humides

[C1] Système de culture irriguée

a) Critères de télédétection

Géographie : Alluvions hautes du Niger avec proximité d'habitat

Texture d'image : Traces de parcellaire bien visibles

Tonalité : Brun rouge, rouge rose, rose, en complexe.

b) Contenu de l'unité et variations régionales

Polyculture en petites parcelles comportant des arbres fruitiers (manguiers, agrumes, bananiers) des cultures maraichères de contre saison irriguées, des cultures pluviales non irriguées (maïs, sorgho, mil).

Ce système est distribué en ilots dispersés le long de la vallée du Niger, de Sélingué à Ségou. L'essentiel étant localisé à proximité de Bamako où la production agricole est commercialisée.

c) Limite de fiabilité de l'information :

Des surfaces non négligeables se sont jamais irriguées à l'intérieur de cette unité. De nombreux petits périmètres (moins de 10 ha) n'ont probablement pas été identifiés.

[C2] Système de cultures en sec et de culture irriguée

Ce système est situé dans le même contexte géographique que le système C1 dont il se distingue par l'importance des superficies qui ne sont jamais irriguées (en général plus des deux tiers). On exploite toutefois les cultures pluviales à courtes jachères (sorgho, mil, maïs, niébé, etc...).

[C3] Périmètre irrigué organisé

a) Critères de télédétection

Géographie : Plaines alluviales, dépressions inondables endiguées, terrasses, l'exemple type étant fourni par les périmètres de l'Office du Niger ou celui de Baguirada près de BAMAKO.

Texture d'image : Trame de parcellaire régulier apparaissant toutefois de façon plus ou moins nette en fonction des états de surface.

Tonalités : Elles ont sujettes à des variations importantes suivant les états de surface :

- sol nu (gris, gris bleuté) après récolte
- riz en activité (rouge vif à rose)
- riz inondé (rouge foncé, brun rouge noirâtre).

Terres incultes humides (rouge, rose, noir, brun, etc...) ou sèches (gris, gris blanc).

b) Contenu des systèmes et variations régionales

La riziculture irriguée est la principale culture pratiquée, le maraîchage et/ou l'arboriculture fruitière sont toujours représentés en pourcentage relativement modeste mais en croissance constante (cultures de saison sèche).

c) Limite de fiabilité de l'information : L'unité C3 délimite les terres ayant fait l'objet d'un aménagement matériel du parcellaire. A l'intérieur de la zone aménagée les superficies cultivées peuvent varier dans des proportions importantes (quelquefois moins de 50%).

[C4] Systèmes traditionnels associés aux plaines inondables

a) Critères de télédétection

Géographie : Plaines inondables, dépressions inondables, bas-fonds d'une certaine importance.

Texture d'image : Limites de parcellaire fournissant l'indice principal pour l'interprétation.

Tonalité : En saison sèche, réponse gris clair des sols nus contrastant avec la tonalité grise plus foncée des savanes incultes à jachères.

En fin de saison des pluies, les tonalités rose claire, rouge clair sont soulignées par le parcellaire et se distinguent de l'environnement de la zone humide (réponses spectrales variées suivant le type de végétation, humidité du sol ou le degré d'inondation).

b) Contenu des systèmes et variations régionales

Zone sahélienne et soudanienne nord

La culture du sorgho pluvial, et sur certains sites celle du sorgho de décrue sont pratiquement les seules pratiquées.

La vallée de KOLOMBINE constitue un cas particulier avec certains sites cultivés en riz comme les lacs du delta (lac OUII, lac FAGUIBINE) avec d'autres cultures de décrue localement pratiquées (maraichage).

Alluvions du Niger, Delta intérieur du Niger et dépression inondable du Bari

Le système C4 est dominé par la riziculture de submersion avec différentes variétés utilisées en fonction de la hauteur et de la durée d'inondation.

Les terres utilisées ont varié depuis une quinzaine d'année avec :

- abandon de certains sites insuffisamment inondés pour pratiquer la riziculture
- aménagement et mise en culture de nouvelles terres en position topographique plus basse et qui étaient autrefois réservées aux pâturages de décrue (bourgoutières).

Zone soudanienne sud et Soudano-guinéenne

Le système est principalement pratiqué sur les secteurs qui commencent à manquer de terres cultivables en sec où qui ont fait l'objet d'opérations de promotion de la culture des bas-fonds.

En fonction des ressources en eaux des sites, les cultures pratiquées sont le riz (riziculture pluviale de nappe) ou le sorgho (terres moins bien alimentées en eau).

Après une succession d'années sèches la riziculture a été souvent abandonnée et les terres de ce système sont cultivées en sorgho ou laissées en jachères.

c) Limite de fiabilité de l'information

Les indices fournis par le parcellaire demeurent les critères les plus fiables pour la détection de ce système. En revanche la reconnaissance des superficies cultivées au moment de l'enregistrement de l'image satellite reste toujours très délicate.

Sur les images enregistrées en pleine période d'inondation, la riziculture de submersion est très difficile à séparer des autres formes de végétation et les réponses spectrales liées à la présence de l'eau sont parfois dominantes. Sur certaines zones du delta du Niger, l'identification de cette catégorie doit être considérée comme très approximative (voir système 4/C10).

Les parcelles de moins de 50 ha cultivées sur bas-fonds n'ont pas été cartographiées et tendent à se développer en zone Soudano-guinéenne.

Système [C4/C10]

Il est localisé dans le delta intérieur du Niger, et correspond aux sites où la culture du riz est susceptible d'être pratiquée sans qu'il soit possible de bien distinguer le parcellaire sur des images satellites.

Les critères retenus pour la délimitation de cette unité sont des critères de site (analogues à ceux utilisés par le système C4) et critères de proximité (seules terres susceptibles d'être cultivées à proximité du village).

Quelques informations de terrain ont permis de confirmer cette hypothèse mais la plus grande partie des zones délimitées en C4/C10 n'a pas été contrôlée.

Système [C10]

Il est basé sur le même principe que celui traditionnellement pratiqué sur les alluvions inondables du Niger et du Barri (riziculture de submersion). Dans le cas du système C10 des endiguements destinés à retenir l'eau et des ouvrages conçus pour faciliter l'entrée de l'eau et en contrôler la sortie ont été réalisés (casier de submersion contrôlé).

Les surfaces annuellement cultivées sont toujours inférieures à celles du casier équipé, elles varient d'une année à l'autre en fonction de la crue même en partie maîtrisée.

Lorsque la crue est insuffisante les surfaces cultivées peuvent rester très faibles voir nulles.

532 Systèmes mixtes. cultures sur alluvions et zones humides et cultures en sec

[C5] Système des vallées étroites

a) Critères de télédétection

Géographie : Vallées étroites fréquentes dans les zones où les cours d'eau ont des ressources en eau une grande partie de l'année provenant soit de sources soit de la présence d'une nappe phréatique à faible profondeur ou exploitée par puits.

En général les villages ou zones d'habitat sont proches de ces vallées.

Texture d'image : Des traces de parcellaire sont visibles dans de nombreuses vallées et correspondent aux cultures de cycle annuel.

Tonalités : Elles se présentent en mosaïque où alternent des tonalités variables en fonction de l'importance de la strate arborée et de la période d'enregistrement de

l'image : - brun, brun rouge, rouge de la strate arborée

- rose, rose vif, rouge des cultures en activité végétative

- blanc crème, blanc rose des cultures et jachères (en période sèche)

- blanc, avec diverses teintes rose pour les terres humides.

b) Contenu du système et variations régionales

L'unité C5 est présente dans toute la zone Soudanienne avec néanmoins une superficie totale très limitée. Ces régions où ce système est le plus représenté sont :

Les environs de Bamako (Cercles de Koulikoro, Banamba, Kati).

L'ensemble du système se présente comme un complexe formé d'alluvions récentes et de terrasses au pied de glacis et comporte :

- des arbres fruitiers (principalement manguiers)
- des parcelles en cultures pluviales exondées (sorgho, maïs, niébé)
- des parcelles de culture pluviale des zones humides (sorgho, riz)
- dans certaines vallées du maraichage de courte saison irrigué à partir de puits (oignons, tomate, haricot vert, etc...)

Le Pays Dogon où ces vallées concentrent les terres les plus riches (plateau, vallée de piedmont).

Il s'agit de zones densément cultivées (mil, sorgho, niébé, arachide, tabac) et maraichage (tomate, oignon).

La strate arborée comporte une densité relativement importante de Balanzan (*Faidherbia albida*).

La région administrative de Sikasso où certaines de ces vallées sont en cours de mise en valeur avec une orientation vers le riz de bas-fond (Système C4).

c) Limite de fiabilité de l'information

Dans certaines vallées où dominent les arbres la confusion est possible avec des galeries forestières. Dans la pratique toutes les vallées à arbres fruitiers classées en C5 présentent en mélange une densité variable d'autres arbres (*Ficus sp*, *Khaya senegalensis*, *Carapa procera*, *Faidherbia albida* suivant les zones).

533 Systèmes de culture en sec

[C6] Système de cultures permanentes à courte jachère

a) Critères de télédétection

Géographie : ce système occupe habituellement trois types de situation :

- la périphérie immédiate des villages
- les alluvions récentes de grands fleuves où se concentre l'habitat localisé hors inondation.
- les glacis d'épandage densément cultivés en particulier lorsque la culture attelée s'est développée.

Texture d'image : La trame de parcellaire est en général bien visible.

Tonalité : Les tons blanc, blanc gris, blanc rosé, alternent en mosaïque découpés par les parcelles de culture de l'année et de jachère récente.

L'espace occupé par l'habitat apparaît souvent sous la forme d'un cercle gris foncé.

b) Contenu des systèmes et variations régionales

Zone sahélienne nord et sud

Ce système est principalement pratiqué sur sol sableux à sablo-limoneux plus rarement sur des glacis d'épandage qui sont moins fréquents dans la région.

Les cultures dominantes sont le mil et le sorgho, secondairement le niébé et l'arachide (sahélien sud seulement).

La zone couverte par ce système peut bénéficier de la fumure provenant du bétail qui se rassemble près du village.

Au cours de certaines années de sécheresse la récolte est nulle. Sur certaines zones le Balanzan (*Faidherbia albida*) est fréquent.

Zone soudanienne nord et sud

Les cultures sont principalement localisées sur glacis d'épandage. En zone de système traditionnel ce type de culture reste localisé autour du village et bénéficie d'un certain transfert de fertilité apporté par le bétail. Les cultures pratiquées sont variées (mil, sorgho, maïs, arachide, niébé) localement coton en zone soudanienne sud.

Localement on trouve du tabac, du maraîchage de saison des pluies et toujours concentrés dans ce système des arbres fruitiers dispersés mais fréquents (manguiers, karité). Les jachères sont de courte durée 1 à 2 ans ou totalement absentes.

En zone intensifiée avec culture attelée les superficies couvertes, beaucoup plus importantes, occupent la presque totalité des glacis et s'éloignent des villages.

Le système C6 comporte alors un assolement cotonnier avec maïs amélioré, sorgho, niébé, mil et localement arachide. Ce système est très répandu sur les Cercles de Koutiala, Yorosso où la surface cultivée dans ce système est voisine de 2 ha par habitant alors qu'elle n'attient que rarement l'hectare dans le reste du pays.

La jachère est de courte durée 1 à 3 ans et elle est localement absente.

Seuls les arbres fruitiers où considérés comme "utiles" sont conservés (néré, karité) les autres essences ligneuses sont progressivement éliminées pour faciliter le labour en culture attelée.

Sur les images SPOT ce système C6 apparaît de façon très claire avec une réponse spectrale de "sol nu".

En zone soudano-guinéenne le système traditionnel domine limité aux abords immédiats du village, la majeure partie du vote de l'espace cultivé étant basé sur une jachère de longue durée système C7.

[C7] Système des cultures itinérantes à longues jachères

a) Critère de télédétection

Géographie : Ce système correspond comme le précédent à des ensembles de parcelle comportant des zones cultivées et des jachères récentes (1 à 3 ans suivant les vigueur de la végétation).

La distribution du système C7 par rapport à l'habitat est toutefois différente, il s'agit des terres plus éloignés du village que celle du système C6. Sauf cas particuliers ces ensembles sont dispersés au milieu de jachères plus anciennes où de formations végétales sylvo-pastorales ayant une certaine aptitude à l'agriculture. Après un cycle de 2 à 4 ans de culture ces terres retournent à une jachère de longue durée qui peut varier de 5 à 10 ans, voir plus.

Texture d'image : La trame du parcellaire tranche en général de façon assez nette avec la végétation des jachères anciennes qui l'entourent.

Tonalité : Sur les images de saison sèche les tonalités sont dominées par des réponses spectrales "sol nu" comme pour la catégorie C6. Elles correspondent soit aux cultures de l'année soit aux jachères peu couvertes de végétation. Il s'agit en général de jachères récentes (moins de 3 ans) mais on gardera en mémoire que la densité de la végétation et les réponses correspondantes restent dépendantes :

- de la période de l'année ou l'image a été enregistrée
- de l'intensité du défrichement pratiqué
- de la capacité de croissance de la végétation des jachères liées à la nature du sol et la pluviométrie des années qui suivent l'abandon de la culture.

b) Contenu du système et variations régionales

La nature des cultures pratiquées est comme pour le système C6 dépendantes du contexte agroclimatique local pour les cultures vivrières et de l'impact des opérations de développement pour les cultures de rente (mais aussi parfois pour le développement de certaines cultures vivrières autoconsommées).

Lorsque les parcelles cultivées dans le système C7 sont éloignées du village, elles ne bénéficient d'aucun transfert de fertilité et sont souvent moins bien sarclées que celles des terres localisés près du village (C6).

Dans les terroirs densément peuplés (système C6 dominant) les parcelles en C7 occupent souvent les terres les plus pauvres (haut de glacis, collines gravillonnaires).

Enfin dans certaines régions le système C7 est le seul représenté sous la forme de parcelles disposées sur tout le territoire et séparées par de vastes jachères de longue durée.

Zone sahélienne nord et sud

Il est souvent le seul pratiqué avec mil, sorgho et localement niébé et arachide (sahélien sud) (Cercles de Yéla Aminé, Nioro, Diéma, Nara). Les terres utilisées sont à dominante sableuse, faciles à travailler et permettant un enracinement rapide des cultures. Localement les glacis bénéficiant du ruissellement sont utilisés. Dans la région de Mopti des levées sableuses alluviales, les cordons dunaires anciens sont utilisés mais des cultures de zones humides fournissent aussi une partie importante de la production vivrière.

Zone soudanienne

Dans la partie faiblement peuplée de la région de Kayes c'est le système dominant (mil, sorgho, niébé, arachide) avec des arbres conservés lors des défrichements (karité, néré).

En zone densément occupée (Koutiala, Yorosso, Siakasso) il est surtout présent sur les terres les plus pauvres nécessitant une longue jachère.

Zone soudano-guinéenne

Il constitue le système dominant, sur le Cercle de Kadiolo, il couvre 9% de la superficie dispersé en de multiples parcelles présentes sur l'ensemble du territoire. La jachère est pratiquée sur une longue période, 7 à 10 ans et souvent plus.

c) Limite de fiabilité de l'information

Mêmes remarques que celles évoquées pour une distinction parfois difficile entre le classement des groupes de parcelles en C6 ou en C7.

534 Zones incultes ayant localement une potentialité agricole (sous réserve de contrôle de terrain et de la nécessité de préserver l'environnement)

La délimitation de ce type de terre tient compte :

a) de l'utilisation agricole et la localisation morphopédologique des terres habituellement utilisées par les différents systèmes d'occupation agricole pratiqués.

b) de la caractérisation morphopédologique des terres actuellement incultes.

L'hypothèse a été faite que les unités morphopédologiques actuellement incultes pourraient être un jour cultivées lorsque ces mêmes types d'unité sont habituellement utilisés dans d'autres secteurs plus densément peuplés.

Il s'agit par exemple des glacis colluviaux intégralement mis en valeur dans les zones à fort peuplement et très partiellement cultivés dans la région à forte densité de population.

Malgré la précision approximative de cet inventaire dans le domaine de la connaissance de la morphopédologie qui n'était pas l'objet de l'inventaire, la cartographie de ces zones incultes ayant une potentialité agricole présente un double intérêt :

- permettre l'évaluation et la localisation des réserves en terres.
- mettre en évidence un certain nombre de zones encore boisées mais qui sont susceptibles d'être tôt ou tard défrichées en l'absence de statut permettant leur conservation.

Dans bon nombre de région du Mali, certaines de ces terres concentrent l'essentiel du stock sur pied (en volume, en qualité des essences et en capacité de régénération). Ce constat est écologiquement normal, les sols profonds bien drainés et à bonne réserve en eau étant à la fois favorables à la végétation ligneuse et à la production agricole.

535 Aptitudes agricoles des unités cartographiques correspondant aux systèmes culturels pratiqués sur les zones humides, inondables, alluvions et bas-fonds

L'aptitude agricole de ces terres est sujette à de fortes variations qui dépendent :

- des conditions de site : inondation et contrôle de l'eau, besoin en endiguement et/ou drainage.
- des conditions climatiques : apports annuels en eau sur les zones humides qui dépendent de la zone bioclimatique et des aléas de pluviométrie annuelle. Les contraintes liées à ces ressources en eau par excès ou par défaut pour satisfaire la principale culture pratiquée c'est-à-dire celle du riz.
- des conditions socio-économiques : qui font que telle région ou tel terroir a l'habitude de l'utilisation agricole de ce type de terre et les moyens de les mettre en valeur (labour, desherbage, contrôle de l'eau, irrigation complémentaire, etc...).
- Des conditions de densité démographique : qui font que même certaines terres traditionnellement peu cultivées finissent par l'être lorsque les besoins en terres augmentent.

On retiendra donc que la délimitation de ces unités correspond à la mise en évidence de conditions particulières de site favorables à certains types d'agriculture mais l'évaluation des aptitudes agricoles de ces sites relève d'études spécifiques plus complètes à réaliser site par site.

En conséquence les chiffres de surface de ces unités sont à utiliser avec les réserves précédemment évoquées.

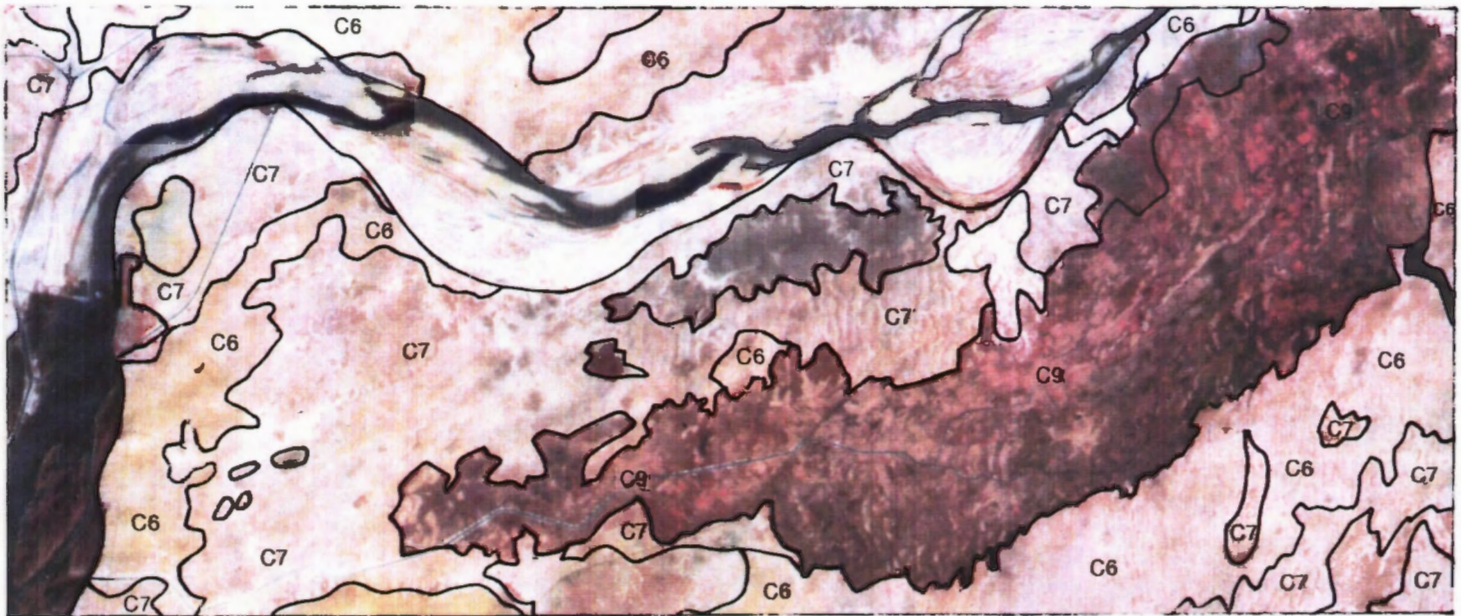
536 Unités cartographiques correspondant aux systèmes de culture en sec.

L'aptitude agricole des unités morphopédologiques incultes classées dans cette catégorie doit être toujours replacée dans le contexte bioclimatique local. En zone sahélienne Nord (moins de 400 mm) l'aptitude reste très théorique car depuis 20 ans les terres aptes à la culture n'ont, en réalité, été très peu exploitées.

Les terres incultes classées comme apte aux cultures itinérantes avec longues jachères (catégorie 7) sont souvent des terres à fertilité fragile, difficilement utilisable en agriculture permanente intensifiée (C.f. Rapport de synthèse régional).

Les chiffres de superficie relativement importants dans certaines régions pour cette catégorie (Sud du Mali) doivent là aussi être utilisés avec précaution dans la mesure où l'environnement doit être préservé en vue d'une utilisation agricole durable.

EXTRAIT DE LA CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION AGRICOLE



KJ 44-323 5/01/88 TERROIR IRRIGUE (Office du Niger Macina)

C6	Système de cultures permanentes en sec ou à jachères de courte durée
C7	Système de cultures itinérantes en sec ou à jachères de longue durée
C9	Riziculture avec aménagement hydraulique



KJ 39-319 10/12/86 TERROIR SAHELIEEN (Nord Ouest de Nara)

C6	Système de cultures permanentes en sec ou à jachères de courte durée
C7	Système de cultures itinérantes en sec ou à jachères de longue durée

EXTRAIT DE LA CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION AGRICOLE



KJ 45-325 24/11/87 TERROIR SATURE (région de Koutiala)

C3	Système de cultures en périmètre organisé	C6	Système de cultures permanentes en sec ou à jachères de courte durée
C4	Système de cultures associées aux plaines inondables	C7	Système de cultures itinérantes en sec ou à jachères de longue durée



KJ 39-325 10/01/87 TERROIR NON SATURE (région ouest de Bamako)

CULTURES + JACHERES

C4	Système de cultures associées aux plaines inondables
C5	Système de cultures associées aux vallées étroites
C6	Système de cultures permanentes en sec ou à jachère de courte durée
C7	Système de cultures itinérantes en sec ou à jachères de longue durée

POTENTIALITES

P4	Unité compatible avec les systèmes de type C4
P5	Unité compatible avec les systèmes de type C5
P7	Unité compatible avec les types de culture C7, sur glacis ou terrasse

Chapitre 6

DESCRIPTION DES PAYSAGES VEGETAUX

6 Description des paysages végétaux

Ce chapitre présente la description des unités cartographiques des paysages végétaux qui ont été retenus pour la cartographie définitive. Il complète ainsi les tableaux-légendes qui figurent sur les cartes et dans le chapitre Télédétection et Cartographie de la Végétation.

Chaque unité est codifiée de la façon suivante : PXX.Y

avec P pour paysage : cette lettre permet d'éviter une confusion avec code chiffré des unités morphopédologiques qui figure aussi sur la carte de la végétation

XX nombre de deux chiffres pour l'unité

Y nombre de 1 à 5 pour le domaine bioclimatique.

Les domaines bioclimatiques ont été retenus sur la base des isohyètes pour la période 1922 - 1980

0 :	200 < P < 400 mm/an	Sahélien nord
1 :	400 < P < 600 mm/an	Sahélien sud
2 :	600 < P < 800 mm/an	Soudanien nord
3 :	800 < P < 1000 mm/an	Soudanien nord - Transition sud
4 :	1000 < P < 1200 mm/an	Soudanien sud
5 :	1200 mm/an < P	Soudano - Guinéen

Exemple : unité P31.3 : paysage associé aux glacis d'épandages dans le domaine Soudanien Nord.

On trouvera dans le rapport de synthèse régionale et pour chaque unité administrative du Cercle un certain nombre d'informations : volume sur pied, accroissement annuel estimé, mortalité des arbres et principales espèces utiles présentes.

61. Paysages associés aux chenaux longitudinaux du lit majeur du Niger et/ou du Bani (unités cartographiées : P11.2 et P11.3).

Ce paysage hétérogène est constitué par une succession de bandes plus ou moins parallèles de formations hygrophiles dans le fond des chenaux et sur le sol quasiment nu sur les bourrelets.

Suivant les cas il est plus ou moins dégradé, et on peut trouver des zones relativement riches qui avoisinent des zones dépourvues de toute végétation ligneuse.

Dans l'ensemble le volume ligneux est faible et surtout distribué de manière très hétérogène. En général on peut considérer que les zones intactes présentant une végétation ligneuse hygrophile ne représentent pas plus de 10 % du paysage. Dans les formations intactes (ou à peu près intactes) la végétation est très caractéristique et l'on trouve presque toujours :

Ligneux dominants : *Pterocarpus santalinoïdes*, *Berlinia grandifolia*, *Mitragyna inermis*.

Ligneux dominés : *Mimosa pigra*, *Cynometra vogelii*, *Sesbania sesban*...

Graminées : *Vetiveria nigritana*, *Vetiveria fulvibarbis*, *Eragrostis gangetica*...

Sur les bourrelets la végétation est moins touffue (voire absente) et l'on trouve suivant le degré de dégradation : *Mitragyna inermis*, *Ptilostigma thonningii*, *Ptilostigma reticulatum*, *Guiera senegalensis*.

Cette description correspond au paysage-type tel qu'on le rencontre dans le domaine bioclimatique 3 (P11.3). Lorsque l'on monte vers le nord des essences comme *Cynometra vogelii* ou *Sesbania sesban* ont tendance à disparaître et *Berlinia grandifolia* est souvent remplacé par *Anogeissus leiocarpus* et *Diospyros mespiliformis* (P11.2).

Il existe aussi localement de grandes plages uniquement herbacées dominées par un cortège variable de graminées où se mêlent ripicoles, psammophiles, rudérales etc...

Au niveau des estimations de volume ces formations sont complexes, car terriblement hétérogènes. Néanmoins nous retiendrons pour les zones intactes un volume de l'ordre de 50 - 100 m³/ha (90 % du paysage) et pour les zones dégradées et les bourrelets (10 % du paysage) un volume inférieur à 15 m³/ha.

Pour une pluviométrie inférieure à 800 mm/an ces chiffres doivent être réduits, en particulier dans les zones intactes (30 - 60 m³/ha).

Il convient enfin de ne pas perdre de vue le point suivant :

Dans de telles formations le volume ligneux doit être considéré comme une ressource dont le principal intérêt réside surtout dans la stabilisation des berges donc, la vocation est prioritairement la protection.

62. Paysages associés aux plaines d'inondation des grands cours d'eau
(unités cartographiées P12.1, P12.2, P12.3, P12.4, P12.5)

Ce type de paysage est composé de deux formations d'inégale importance : sur plus de 90 % de sa surface (plaines d'inondation) il est couvert par une prairie hygrophile quasiment dépourvue de ligneux et sur la surface restante (berges) par une galerie forestière inondable plus ou moins développée.

Il est dominé par des taxons ripicoles comme : *Mitragyna inermis*, *Pterocarpus santalinoïdes* pour les domaines bioclimatiques 1 et 2, (P12.1 et P12.2), auxquels s'ajoutent *Dialium guinéense*, *Raphia sudanica*, *Cynometra vogelii*... pour les domaines bioclimatiques 3 et 4 (P12.3 et P12.4). Plus au sud le paysage P12.5 présente un caractère guinéen nettement accentué avec la présence de *Dialium guineense*, *Antiaris toxicaria*, *Anthostemma senegalense* etc...

Encore peu mis en valeur, ce paysage dont l'intérêt forestier se limite à la stabilisation des berges, présente un fort intérêt agricole pour la riziculture de bas fonds, dans la mesure où les ressources en eau et la possibilité de sa maîtrise le permettent.

Le volume ligneux est quasi nul dans la plaine, et varie entre 50 et 80 m³/ha dans la galerie, avec à la faveur de conditions locales favorables des extrêmes à 150 m³/ha. Toutefois les arbres sont en général mal conformés et le taux d'espèces intéressantes est faible.

63. Paysages associés aux systèmes de mare temporaire (unité cartographiée P13.1)

Les mares se présentent de manière sporadique dans le paysage et leur extension spatiale est généralement faible ; toutefois il existe de grandes mares cartographiables (sur les affleurements de la série de Kiffa par exemple). Par ailleurs d'autres paysages présentent des concentrations plus ou moins importantes de petites mares non cartographiables mais de physionomie et de composition floristique tout à fait comparables aux précédentes.

Elles sont généralement dominées par : *Mitragyna inermis*, *Anogeissus leiocarpus*, *Acacia nilotica*...

La végétation y est souvent dense avec un sous-bois lianescent de *Combretum*, d'*Acacia* et de *Ziziphus*. Les principales graminées sont des hygrophiles comme : *Panicum laetum*, *Echinochloa spp*, *Oryza longistaminata*.

Le volume ligneux y est variable, fonction de la dégradation plus ou moins forte due au surpâturage ; néanmoins nous l'estimons à 30-50 m³/ha, sur des formations qui n'occupent en fait que la périphérie des mares ou les axes ripicoles soit environ moins de 10 % de l'unité P13.1. Ce volume qui peut paraître important compte tenu des contraintes bioclimatiques doit être nuancé du fait de l'extrême dispersion et de la fragilité de la ressource.

On rencontre ce type de paysage essentiellement dans le nord du pays. Il a été codifié pour l'ensemble de l'inventaire sous la forme P13.1.

64. Paysages associés aux plaines alluviales du Seno-Gondo (unités cartographiées P14.2 et P15.2)

Le tiers sud-est du Cercle de Bankass est traversé par le Sourou, un des affluents de la Volta-Noire. De part et d'autre de cette rivière se sont développées des plaines alluviales sur lesquelles se sont installés des paysages végétaux caractéristiques de cette zone.

On en distingue deux types :

64.1 liés aux plaines alluviales limoneuses ou argileuses (P14.2)

Les sols de ces plaines sont profonds, à texture limono-sableuse en surface. Les plaines situées directement en bordure du Sourou sont mal drainées (présence d'hydromorphie en profondeur), alors que les parties les plus éloignées du cours d'eau ne présentent aucune trace d'hydromorphie.

Cependant nous retrouvons en commun sur ces deux types de sol une savane arbustive à arborée composée d'espèces identiques, tant du point de vue ligneux qu'herbacé.

Pour les ligneux nous avons rencontré le plus souvent :

- *Anogeissus leiocarpus*
- *Acacia seyal*
- *Pterocarpus lucens*
- *Combretum micranthum*
- *Feretia apodanthera*
- *Dalbergia melanoxylon*
- *Ziziphus mauritiana*, etc...

La strate herbacée est composée de graminées annuelles telles que :

- *Pennisetum pedicellatum*
- *Schoenefeldia gracilis*
- *Andropogon pseudapricus*
- *Loudetia togoensis*, etc...

Les volumes ligneux varient de 10 à 25 m³/ha, et peuvent atteindre 35 m³/ha dans les meilleures conditions.

64.2 liés aux glakis de dénudation (P15.2)

Ce type se différencie du précédent par la présence de larges plages de dénudation généralement gravillonnaire. Sur ces plages la végétation est rare voire même inexistante. En mosaïque avec ces glakis de dénudation se développent des plaques de végétation de composition identique à l'unité précédente, tant du point de vue de la présence des essences, de leur densité que du volume ligneux.

Ces plaques de végétation représentent en moyenne 30 % de la superficie du paysage : le volume ligneux est d'environ 6 m³/ha.

La plaine du Seno-Gondo se trouvant en plein domaine bioclimatique 2 nous avons codifié ces paysages sous la forme P14.2 et P15.2.

65. Paysages associés aux vallées étroites (unité cartographiée P21.1, P21.2, P21.3, P21.4, P21.5)

Bien que de composition différente les galeries forestières sont présentes sur l'ensemble de la zone inventoriée. Elles n'ont tendance à disparaître que sur les milieux très sableux du nord.

Nous allons les décrire du nord au sud telles que nous les avons rencontrées au cours de l'inventaire.

651 Les galeries de type sahélien ou soudano-sahélien (P21.1, P21.2)

Quand elles existent ce sont des galeries dominées par des essences classiques comme : *Anogeissus leiocarpus*, *Mitragyna inermis*, *Pterocarpus erinaceus*, *Piliostigma reticulatum*, *Acacia* spp...

Les graminées comportent un mélange d'hygrophiles et d'espèces des formations voisines : *Panicum laetum*, *Echinochloa colona*, *Pennisetum pedicellatum*, *Andropogon pseudapricus*, *Aristida* spp...

Le volume de ces formations qui sont parmi les plus riches de cette zone bioclimatique varie entre 20 et 40 m³/ha.

Ces paysages sont peu étendus et leur vocation principale reste la conservation.

Au sud de l'isohyète 800 mm/an nous avons deux formations en présence : d'une part les galeries forestières, d'autre part les formations hygrophiles en bordure de celles-ci. Ces dernières pouvant être boisées ou bien uniquement herbacées.

652 Les galeries forestières soudanienues et guinéennes (P21.3, P21.4, P21.5)

Elles colonisent sporadiquement et en frange étroite les berges des marigots et sont de deux types :

dans la partie nord, type soudanien

dans la partie la plus méridionale, type guinéen.

a) Les galeries forestières de type soudanien (P21.3)

Elles sont dominées par un cortège floristique classique et d'obédience nettement soudanienne :

Ligneux dominants : *Anogeissus leiocarpus*, *Ficus gnaphalocarpa*, *Daniellia oliveri*, *Khaya senegalensis*...

Ligneux dominés : *Sarcocephalus esculentus*, *Pterocarpus santalinoïdes*, *Piliostigma thonningii*, *Cordia myxa*, *Spondias monbin*...

Graminées : elles sont sensiblement les mêmes que pour le type guinéen.

b) Les galeries forestières de type guinéen (P21.4 et P21.5)

Elles sont dominées par un cortège floristique bien particulier (de type guinéen) et nous avons (à titre indicatif car la composition est souvent beaucoup plus complexe) :

Ligneux dominants : *Berlinia grandiflora*, *Ficus congensis*, *Daniellia oliveri*, *Erythrophleum guineense*

Ligneux dominés : *Sarcocephalus esculentus*, *Manilkara multinervis*, *Raphia sudanica* (Palmier raphia), *Elais guineensis* (Palmier à huile), *Pterocarpus santalinoïdes*, *Vernonia colorata*...

Graminées : elles sont rares sous couvert, mais on trouve souvent :

Vetiveria fulvibarbis, *Paspalum scrobiculatum*, *Panicum anabaptistum*, *Eragrostis gangetica*, *Oxitenanthera abyssinica*...

Dans la zone de jonction ces deux types s'interpénètrent et nous avons une galerie dont la composition floristique est à mi-chemin des deux précédentes.

Ce sont les formations végétales les plus riches parmi toutes celles en présence et leur volume est souvent supérieur à 120 m³/ha pour des zones non dégradées et atteint presque 250 m³/ha pour certains sondages. Elles concentrent une grande partie des ressources en bois d'oeuvre au Mali.

Bien souvent la largeur de ces formations n'excède pas une cinquantaine de mètres et on ne peut les cartographier au 1/200 000° que sous la forme d'un trait. De plus elles ne se présentent pas de manière continue le long des cours d'eau ce qui rend une estimation de leur superficie encore plus aléatoire.

Dans certains cas (en particulier lorsque le relief est prononcé) elles ne sont même pas cartographiables.

c) Les formations hygrophiles en bordure des précédentes

Quand la topographie le permet la forêt galerie s'étend sous une variante plus claire, au delà des berges du marigot et forme une forêt plus ou moins dense en mélange avec les essences des formations avoisinantes comme : *Isoberlinia doka*, *Lannea spp*, *Bombax costatum*.

Dans d'autres cas c'est une formation essentiellement herbacée qui jouxte la galerie forestière. Elle est alors dominée par des graminées hygrophiles comme : *Vetiveria spp*, *Panicum spp*, etc...

Il n'est malheureusement pas possible de séparer ces deux cas sur l'image satellite, aussi dirons nous que le volume ligneux de telles formations peut-être compris entre 0 et 80 m³/ha.

Pour l'ensemble "forêt galerie + formation hygrophile associée" les différentes données d'inventaire en notre possession nous suggèrent un volume ligneux à l'hectare compris entre :

40 et 60 m³/ha pour l'unité P21.3
 50 et 80 m³/ha pour l'unité P21.4
 80 et 100 m³/ha pour l'unité P21.5.

66. Paysages associés aux glacis d'épandages (unités cartographiées P31.1, P31.2, P31.3, P31.4, P31.5)

Pour la quasi totalité il s'agit de systèmes de jachère plus ou moins anciens, une grande partie du paysage étant d'ailleurs en culture.

En fonction du domaine bioclimatique dans lequel est situé le paysage nous aurons les formations suivantes :

661 domaines sahélien nord et sud (P31.1, P31.2)

Les conditions climatiques qui règnent dans cette zone sont peu propices à l'existence du parc à karité, aussi les systèmes de jachère sont-ils généralement dominés par une strate lâche d'*Acacia* ou d'*Adansonia* et colonisés par un cortège d'héliophiles pionnières comme *Guiera senegalensis*, *Combretum glutinosum*, *Piliostigma reticulatum*, etc...

La couverture graminéenne y est un mélange de rudérales nitrophytes et de pionnières.

La plus grande part du volume sur pied est fournie par les quelques individus préservés lors des défrichements. Ce volume varie entre 15 et 25 m³/ha. Le recrû ligneux sur jachère est souvent médiocre, mais représente une source de bois non négligeable pour les ruraux.

662 domaine soudanien nord et sud (P31.3, P31.4 et P32.3)

Le paysage est essentiellement occupé par les cultures et les quelques secteurs non cultivés, au moment de la prise de vue, peuvent être séparés en :

a) zones "vierges" ou très anciennement occupées (unité P32.3)

Suivant les potentialités locales les zones "vierges" sont couvertes par une savane boisée ou une forêt claire généralement dominée par un groupe restreint de grandes légumineuses grégaires dont : *Isoberlinia doka*, *Daniellia oliveri*, *Pterocarpus erinaceus*.

En dehors des espèces précédentes on trouve très souvent :

Ligneux dominants : *Burkea africana*, *Prosopis africana*, *Vitellaria paradoxa*, *Bombax costatum*, *Lannea acida*...

Ligneux dominés : *Combretum glutinosum*, *Detarium microcarpum*, *Terminalia laxiflora*, *Terminalia macroptera*, *Lannea velutina*, *Pericopsis laxiflora*, *Monotes kerstingii*, *Swartzia madagascariensis*, *Entada africana*...

Graminées : *Andropogon gayanus*, *Andropogon pinguipes*, *Pennisetum pedicellatum*, *Pennisetum subangustum*, *Hyparrhenia rufa*, *Diheteropogon amplexans*, *Schyzachyrium* spp...

Les formations les plus riches se trouvent essentiellement dans les forêts classées dans la mesure où la pression agricole et pastorale ne sont pas trop fortes.

Le volume de ces forêts claires protégées avoisine les 60 m³/ha mais malheureusement leur surface se réduit en peau de chagrin et la majeure partie du paysage est occupée par des savanes plus pauvres qui sont très souvent des formes de substitution de la forêt claire originelle.

Nous retiendrons donc pour ces formations un volume ligneux plutôt compris entre 25 et 45 m³/ha (avec une moyenne d'environ 35 m³/ha), tout en ne perdant pas de vue que dans certaines conditions favorables elles peuvent être nettement plus riches.

b) systèmes de jachères anciennes (P31.3, P31.4)

Il s'agit de formations de savane-verger à recrû forestier plus ou moins développé, en fonction de l'âge et de la durée de la jachère.

Essentiellement dominée par les arbres utiles : *Vitellaria paradoxa* (Karité), *Parkia biglobosa* (Néré), on y trouve aussi quelques gros pieds de : *Khaya senegalensis*, *Ficus* spp, *Pterocarpus erinaceus*, et un recrû héliophile à : *Combretum glutinosum*, *Terminalia macroptera*, *Pteleopsis suberosa*, *Piliostigma thonningii*...

La couverture herbacée est un mélange de rudérales, d'adventices et de graminées de formation naturelle comme : *Imperata cylindrica*, *Pennisetum pedicellatum*, *Pennisetum subangustum*, *Andropogon gayanus*...

Le volume ligneux de ces savanes-vergers oscille entre 15 et 30 m³/ha (avec une moyenne d'environ 20 m³/ha) fonction du nombre d'individus conservés et de leur taille (souvent importante).

663 domaine soudano-guinéen (P31.5 et P32.5)

La composition floristique est la même que celle décrite précédemment, seuls un volume et une productivité plus élevés en liaison avec la pluviométrie justifie la différenciation qui est faite entre ces unités et les unités précédentes :

forêts claires et savanes boisées : 35 à 65 m³/ha (P32.5)
savanes vergers : 15 à 30 m³/ha (P31.5)

67. Paysages associés aux zones instables à érosion agressives (unités cartographiées P33.1, P33.2, P33.3)

En bordure de marigot et en fonction de la résistance du matériau des berges se trouvent des zones d'érosion actives (Bad Lands). La végétation s'y installe tant bien que mal et nous pouvons distinguer suivant la nature du matériau et en fonction des différents domaines bioclimatiques :

671 domaine sahélien nord et sud (P33.1 et P33.2)

- Bad lands sur matériau cuirassé : la végétation y est extrêmement pauvre et dominée par *Pterocarpus lucens*, *Combretum micranthum*, *Boscia senegalensis*.
- Bad lands sur matériau non cuirassé : la végétation y est un peu plus "riche" et dominée par *Acacia seyal*, *Combretum micranthum*, *Grewia* spp...

Dans les deux cas les volumes sont faibles, presque toujours inférieurs à 5 m³/ha.

672 domaine soudanien nord (P33.3)

Ce paysage est essentiellement une formation irrégulière très ouverte, de type arbustif bas dominé par *Pterocarpus lucens*, *Combretum micranthum*.

Dans les ravines stabilisées on peut trouver des individus assez bien développés de *Manilkara multinervis*, *Pterocarpus* spp, *Isoberlinia tomentosum*.

Dans l'ensemble les ligneux sont rares et les volumes négligeables. Ces zones sont de plus très instables et doivent être protégées de toute exploitation.

68. Paysages associés aux basses collines cuirassées (unités cartographiées P41.1, P41.2, P41.3, P41.4, P41.5)

Ce modèle de collines cuirassées se rencontre sur l'ensemble de la zone inventoriée et présente donc des caractéristiques différentes suivant la latitude où il se trouve.

Au nord de l'isohyète 800 mm/an (P41.1, P41.2) avec ses sols squelettiques et ses cuirasses sub-affleurantes il constitue un milieu xérique très pauvre.

Dans l'unité P41.2 la végétation se présente en plaques dominées par *Pterocarpus lucens*, *Combretum* spp. Localement quelques grands pieds de *Bombax costatum* ou *Lannea microcarpa* émergent de la strate buissonnante.

Dans l'unité P41.1 les plaques s'amenuisent et sont souvent réduites à un individu, la densité baisse, et l'on note l'apparition de taxons nettement xériques septentrionaux comme *Acacia raddiana*.

La strate herbacée est sensiblement la même pour les deux unités et est composée d'annuelles sur sols gravillonnaires comme *Loudetia togoensis*, *Microchloa indica*, *Andropogon pseudapricus*, *Elionurus elegans*...

Le volume ligneux est faible et varie de 0 à 20 m³/ha, en fonction du degré de cuirassement et de la pluviométrie.

Au sud de l'isohyète 800 mm/an (P41.3, P41.4, P41.5) il s'agit pour l'essentiel d'un système de savane arborée ou boisée et de bowal avec possibilité dans la partie la plus méridionale d'un système de forêt claire.

Les bowé sont essentiellement dominés par des herbacées annuelles comme *Andropogon pseudapricus*, *Loudetia togoensis*, *Ctenium* spp.

On y trouve localement quelques pieds rabougris ou mal conformés de *Combretum* spp, *Lannea* spp, etc..., mais dans l'ensemble la couverture ligneuse est très faible.

La composition floristique est sensiblement la même pour les savanes boisées et arborées :

Ligneux dominants : *Lannea microcarpa*, *Pterocarpus erinaceus*, *Bombax costatum*, *Sterculia setigera*, *Lannea acida*...

Ligneux dominés : *Combretum glutinosum*, *Combretum micranthum*, *Combretum nigricans*, *Pterocarpus lucens*, *Acacia macrostachya*, *Acacia ataxacantha*, *Acacia erythrocalix*, *Detarium microcarpum*, *Terminalia* spp, *Cassia sieberiana*...

Graminées : *Loudetia togoensis*, *Andropogon pseudapricus*, *Andropogon gayanus*, *Schizachyrium* spp, *Pennisetum pedicellatum*, *Diheteropogon amplexans*...

Pour les forêts claires, la composition est sensiblement identique avec toutefois un pourcentage plus important de grandes légumineuses grégaires comme : *Isobertinia doka*, *Burkea africana*, *Pterocarpus erinaceus*, etc...

C'est dans ces formations qu'ont été incluses les forêts claires de bas de cuirasse trop étroites pour être cartographiées au 1/200 000°. Elles sont cependant intéressantes du fait de leur composition floristique qui comprend des essences de bois d'oeuvre parmi les plus utilisées au Mali comme *Khaya senegalensis* et *Azizelia africana*.

Lorsque le couvert est assez dense la couverture graminéenne s'appauvrit et on note l'apparition d'espèces sciaphiles comme *Andropogon tectorum* ou *Andropogon pinguipes*.

En résumé, suivant la latitude, le paysage est constitué :

- pour l'unité P41.3
 - Bowé typiques : 15 % (0 à 10 m3/ha)
 - Savanes arborées : (10 à 20 m3/ha)
 - + savanes boisées : 80 % (15 à 35 m3/ha)
 - Forêts claires : 5 % (40 à 50 m3/ha)
- pour l'unité P41.4
 - bowé ± arborés : 15 % (0 à 35 m3/ha)
 - Savanes boisées : 60 % (25 à 45 m3/ha)
 - Forêts claires : 25 % (50 à 60 m3/ha)
- pour l'unité P41.5
 - Bowé ± arborés : 15 % (0 à 35 m3/ha)
 - Savanes boisées : 35 % (25 à 45 m3/ha)
 - Forêts claires : 50 % (50 à 80 m3/ha)

69. Paysages associés aux basses croupes et glacis carapacés
(unités cartographiées P42.1, P42.2, P42.3 et P42.4)

Comme les précédents, auxquels ils sont d'ailleurs souvent associés, ces paysages se rencontrent sur l'ensemble de la zone inventoriée. Ils sont essentiellement dominés par un système de savane boisée ou arborée physionomiquement très proche de celui du paysage P41. Les différences résultent principalement par une mise en culture possible (qui entraîne une érosion et colluvionement en bas de pente), ce qui n'est presque jamais le cas dans le paysage P41. D'autre part on constate le remplacement des bowé par des glacis de dénudation d'origine plutôt anthropique ou par des cuirasses de bas de pente discontinues.

Les compositions floristiques de ces unités sont très voisines de celles observées dans les unités précédentes pour chaque domaine bioclimatique (P41.1, P41.2 etc...).

Suivant la latitude le paysage est constitué :

- pour l'unité P42.1
 - Savanes arborées : 85 % (10 à 15 m3/ha)
 - Glacis de dénudation : 15 % (\leq 5 m3/ha)
- pour l'unité P42.2
 - Savanes arborées : 85 % (10 à 20 m3/ha)
 - Glacis de dénudation : 15 % (\leq 5 m3/ha)
- pour l'unité P42.3
 - Savanes arborées : 90 % (10 à 20 m3/ha)
 - Glacis de dénudation : 10 % (\leq 5 m3/ha)
- pour l'unité P42.4
 - Savanes arborées : 90 % (15 à 20 m3/ha)
 - Glacis de dénudation : 10 % (\leq 5 m3/ha)

6.10 Paysages associés aux vieilles surfaces d'aplanissement (unités cartographiées P43.3, P43.4, P43.5, P44.4 et P44.5)

Il s'agit essentiellement d'un système de jachère et de parcours témoins d'une longue occupation humaine. Nous avons affaire à une vieille savane verger à karité et à néré, du même type que celle que nous avons décrite au paragraphe 66

- Unité P43.3 :

La savane-verger (ou savane-parc) est essentiellement dominée par : *Vitellaria paradoxa*, *Parkia biglobosa*, *Pterocarpus erinaceus*...

En fonction de l'ancienneté de la mise en culture nous avons un recru arbustif plus ou moins développé avec : *Combretum spp*, *Entada africana*, *Detarium microcarpum*, *Terminalia spp*, *Lannea spp*, *Piliostigma thonningii*...

Le tapis graminéen est très variable en fonction du degré d'anthropisme de la formation. Il s'agit d'un mélange de rudérales, d'adventices et de graminées de formation naturelle, on y trouve pêle-mêle : *Andropogon gayanus*, *Schizachyrium spp*, *Pennisetum pedicellatum*, *Pennisetum subangustum*, *Hyparrhenia spp*, *Diheteropogon spp*, *Imperata cylindrica*, *Dactyloctenium aegyptium*...

Le volume de cette savane verger varie entre 10 et 30 m³/ha.

- Unités P43.4 et P43.5 :

Dans l'ensemble il s'agit d'un système de jachère et de parcours, émaillé de cultures traditionnelles de type extensif.

La végétation est le reflet de cette occupation humaine et nous avons en très grande majorité une savane-verger assez pauvre entrecoupée dans les zones les plus dégradées ou les plus pauvres de bowé typiques ou de glacis de dénudation (en particulier au sommet des ondulations).

Le volume ligneux de ces formations varie entre 20 (P43.4) et 30 (P43.5) m³/ha, avec toutefois des sites préservés plus riches (jusqu'à 60 m³/ha), malheureusement non décelables sur l'image.

- Unités P44.4 et P44.5 :

Ces unités ont été séparées de l'unité P43 car, bien que situées sur le même type de faciès morphopédologique, elles sont incluses dans les forêts classées et ne subissent pas en principe de pression anthropique. Dans ce cas nous avons affaire à des forêts claires.

Elle se présente sous la forme d'une futaie claire de hauteur moyenne entre 12 et 15 mètres, qui domine un sous-bois variable d'arbustes et de buissons et une strate herbacée graminéenne plus ou moins développée.

L'espèce de loin la plus fréquente dans la futaie est l'*Isoberlinia doka*, mais nous trouvons très souvent en mélange : *Pterocarpus erinaceus*, *Daniellia oliveri*, *Burkea africana*, *Diospyros mespiliformis*, *Azelia africana*, *Khaya senegalensis*, *Prosopis africana*, *Vitellaria paradoxa*, etc...

Dans le domaine soudano-guinéen ce sous-bois est largement dominé par quelques espèces qui s'ajoutent à la liste précédente : *Uapaca togoensis*, *Parinari curatellifolia*, *Monotes kerstingii*, *Lophira lanceolata*.

La strate herbacée est composée de grandes graminées vivaces qui appartiennent en grande majorité à la tribu des Andropogonées (*Andropogon*, *Hyparrhenia*...).

Cette formation est intéressante pour la production locale de bois d'oeuvre (petits sciages) et nous y estimons le volume ligneux entre 40 et 90 m³/ha dont 15 % potentiellement exploitables en bois d'oeuvre.

6.11 Paysages associés aux bas plateaux ± cuirassés à voile sableux
(unité cartographiée P45.1)

Ce paysage prend une grande extension dans la partie sahélienne de la zone inventoriée. Le modelé est un système de bas plateaux ou de basses collines gravillonnaires à cuirassées recouvert de voiles sableux étendus, plus ou moins bien fixés et d'épaisseur variable.

La végétation subit donc l'influence combinée d'un substrat superficiel sableux et d'une assise sub-affleurante gravillonnaire, ce qui explique la co-existence d'espèces typiquement psammophiles comme *Eragrostis* spp, *Schoenefeldia gracilis*, et d'espèces des substratum gravillonnaires comme *Combretum micranthum* et *Loudetia togoensis*.

La strate ligneuse, composée d'arbustes, est largement dominée par le couple *Pterocarpus lucens*-*Combretum micranthum*, nous trouvons aussi fréquemment *Boscia senegalensis*, *Acacia ataxacantha*, *Grewia flavescens*, etc...

La caractéristique physiionomique essentielle du paysage reste cependant la répartition spatiale discontinue de la végétation qui peut provoquer localement l'apparition de faciès de type "brousse tigrée".

Ce faciès n'a pas été individualisé sur la carte à cause de son homologie floristique avec les formations avoisinantes.

Le volume ligneux représente entre 5 et 10 m³/ha.

6.12. Paysages associés aux reliefs vigoureux (unités cartographiées
P51.2, P51.3, P51.4, P51.5, P52.4, P52.5, P53.4)

Nous avons là un milieu dont la caractéristique première est l'hétérogénéité et nous y trouvons une grande variété de formations végétales en liaison directe avec la morphopédologie :

- sur les sommets : nous avons des systèmes de bowé de plateau et de bowé arborés.
- sur les versants : nous avons une savane boisée ou une forêt claire (c'est la formation principale entrecoupée de bowé de versant).
- dans les ravins et certains chaos rocheux il existe parfois des forêts denses sèches relictuelles.
- en bas de pente, dans les marigots et dans les fractures existent des formations hygrophiles qui sont soit des forêts galeries, soit des forêts claires.

Nous traiterons ces formations par ordre d'importance dans le paysage :

6.12.1 savanes boisées à forêts claires de versant (unités P51.2, P51.3, P51.4, P51.5)

Sur les versants non abrupts se développent des savanes boisées voire des forêts claires. Suivant le type de modelé, et en fonction de la pluviométrie nous avons différentes variantes :

Dans la partie la plus septentrionale ce type de modelé est marginal (P52.2). Il est essentiellement dominé par une savane arborée pauvre émaillée par des affleurements rocheux ou des glacis d'érosion.

Cette végétation est dominée par *Pterocarpus lucens*, *Combretum micranthum*, *Combretum nigricans*, *Combretum glutinosum*, avec ici et là quelques individus de *Sclerocarya birrea*, *Sterculia setigera*.

Le volume est généralement inférieur à 20 m³/ha.

Dans les domaines soudanien-nord nous avons une savane boisée pauvre mélangée de bowé arborés dont le volume ligneux dépasse rarement les 30 m³/ha avec une moyenne à 25 m³/ha (unité P51.3).

Dans le domaine soudanien-sud et soudano-guinéen (unités P51.4, P51.5), nous avons encore la même savane boisée, mais son volume atteint fréquemment les 40 m³/ha avec une moyenne à 30 m³/ha. A la faveur de certaines conditions locales se développe aussi une forêt claire très proche de la savane voisine mais au potentiel ligneux plus élevé (voisin de 50 m³/ha). De plus associées à des systèmes d'éboulis stabilisés nous avons des forêts claires dont le volume peut atteindre 60 m³/ha avec une moyenne à 40 m³/ha (unité P53.4).

Localement ces formations sont entrecoupées de bowé de versant situés en général sur des glacis subhorizontaux en rupture de pente.

Ces zones sont stériles et le volume des ligneux n'y dépasse pas les 10 m³/ha.

Pour les savanes boisées nous avons la composition floristique suivante (espèces les plus fréquentes) :

Ligneux dominants : *Lannea acida*, *Bombax costatum*, *Cordyla pinnata*, *Anogeissus leiocarpus*, *Pterocarpus erinaceus*, *Isoberlinia doka*, *Vitellaria paradoxa*, etc...

Ligneux dominés : *Combretum glutinosum*, *Acacia macrostachya*, *Detarium microcarpum*, *Terminalia macroptera*, *Terminalia laxiflora*, *Entada africana*, ...

Graminées : *Loudetia togoensis*, *Andropogon pseudapricus*, *Andropogon gayanus*, *Schizachyrium spp*, *Pennisetum pedicellatum*, *Diheteropogon amplexans*, *Hyparrhenia spp*, ...

Pour les forêts claires, la composition est sensiblement identique avec toutefois un pourcentage plus important de grandes légumineuses grégaires comme : *Isoberlinia doka*, *Burkea africana*, *Pterocarpus erinaceus*, etc...

Lorsque le couvert est assez dense la couverture graminéenne s'appauvrit et on note l'apparition d'espèces sciaphiles comme *Andropogon tectorum* et *Andropogon pinguipes*.

Pour les bowé présents dans ce paysage nous renvoyons le lecteur au paragraphe suivant :

6.12.2 Systèmes de bowé sommitaux (unité P52.4) et bowé de versant

Sur les glacis d'érosion (haut glacis) et les sommets de plateau se développe une végétation par plaque que nous avons dénommé bowal arboré. Par endroit les plaques sans végétation sont vastes et l'on arrive alors insensiblement au bowal nu.

Ces formations végétales sont très pauvres mais localement les plages arborées peuvent être très denses ; la répartition de la végétation reste néanmoins très fractionnée et très hétérogène.

Les plages arborées sont essentiellement dominées par *Pterocarpus erinaceus*, *Lannea microcarpa*, *Bombax costatum*. Nous y trouvons fréquemment des essences adaptées aux milieux gravillonnaires xériques comme : *Hexalobus monopetalus*, *Combretum micranthum*, *Combretum nigricans*, *Pterocarpus lucens*, *Boscia salicifolia*, *Acacia spp*...

La couverture herbacée est la même que sur les bowés nus (cf. infra) avec localement de petites touffes de Bambous (*Oxytenanthera abyssinica*).

Il n'est pas toujours possible sur l'image satellite de distinguer avec une fiabilité suffisante un bowal nu d'un bowal arboré. Les pourcentages relatifs de ces deux formations ont toutefois pu être appréciés.

Les bowé typiques se caractérisent par l'absence quasi totale des ligneux, hormis quelques pieds de *Combretum spp*, *Lannea spp*, *Acacia spp*, généralement installés sur des termitières et rabougris.

Sur ces formations les volumes varient entre 0 et 10 m³/ha pour les bowé nus entre 10 et 25 m³/ha pour les bowé arborés.

6.12.3 Formations hygrophiles

Comme leur nom l'indique elles sont liées à la présence d'eau et se développent de manière préférentielle le long des vallées qui entaillent les reliefs. Dans certains cas elles ne sont pas cartographiables et sont donc incluses dans la savane boisée de versant. Elles restent tout de même marginales dans ces cas et leur description est donnée en détail au paragraphe 5 en même temps que celle des formations associées aux vallées étroites.

6.12.4 Forêts denses sèches

Ce sont des lambeaux relictuels qui ne subsistent qu'à la faveur de conditions stationnelles bien particulières comme ravins ou chaos gréseux. Elles couvrent des surfaces restreintes et non cartographiables au 1/200 000° bien qu'on les reconnaisse souvent sur l'image satellite. Dans le sud il s'agit pour l'essentiel de forêts à *Guibourtia copallifera*.

Ainsi que nous venons de le voir ces paysages végétaux associés aux reliefs accentués sont à la fois variés et très hétérogènes. Il n'est malheureusement pas possible à partir de l'image SPOT de différencier de façon sûre toutes les composantes. seule l'étude comparée de plusieurs dates d'acquisition pourrait lever l'incertitude.

Si nous résumons nous avons :

Formations végétales	Paysage végétal (%)					
	P51.2	P51.3	P51.4	P51.5	P52.4	P53.4
Bowé nus	0	15	15	15	70	--
Bowé arborés-Savanes boisées	100	80	--	--	30	--
Savanes boisées-Forêts claires	--	5	80	80	--	100
Formations hygrophiles	--	--	3	5	--	0
Forêts denses sèches	--	--	2	0	--	0

-- : formation absente

0 : formation rare mais présente

6.13. Paysages associés aux reliefs gréseux de Bandiagara (unités cartographiées P54.1, P55.1, P56.1)

Les paysages caractéristiques du plateau de Bandiagara sont associés aux différents faciès morphopédologiques rencontrés dans cette région bien particulière du pays.

On y distingue trois grands types de faciès.

6.13.1 Plateaux, massifs ou buttes à nette influence structurale (P54.1)

Ici la roche affleure en toutes positions. On observe de nombreuses failles et diaclases dans le fond desquelles se trouvent de rares poches de sol.

Ce type de substrat est dépourvu de ligneux et porte en saison des pluies une couverture graminéenne comprenant entre autres :

- *Loudetia togoensis*
- *Andropogon spp*
- *Eragrostis tremula*

On y rencontre que quelques arbustes tels que :

- *Combretum glutinosum*
- *Combretum micranthum*
- *Boscia spp*
- *Guiera senegalensis*

Les volumes sont toujours inférieurs à 5 m³/ha, et ces zones ne sont guère intéressantes du point de vu forestier.

6.13.2 Modelé collinaire vigoureux (P55.1)

Ce faciès se rencontre sur les pentes rocheuses ou le long des versants. Il se présente sous forme de gradins. Les sols sont quasiment inexistantes (lithosols, régosols) avec par endroits un recouvrement sablo-limoneux superficiel.

Sur ces sols se développe une savane ou une steppe arborée très lâche et on y rencontre des essences comme :

Combretum glutinosum, Combretum micranthum, Balanites aegyptiaca.

Les volumes y sont faibles, mais peuvent atteindre 10 m³/ha dans les meilleures conditions.

6.13.3 Lambeaux de plateaux fossilisés par une cuirasse (P56.1)

Ce faciès domine les unités précédentes. Il s'agit d'une cuirasse à démantèlement gravillonnaire recouverte par endroits par des dépôts sablo-limoneux.

Le paysage est composé d'une mosaïque de végétation en plaques alternant avec des zones d'érosion ou des affleurements latéritiques nus (brousse tigrée).

La végétation quand elle existe est composée par des essences telles que : *Combretum micranthum, Boscia spp, Pterocarpus lucens.*

En général dans la zone inventoriée ces plaques de végétation sont rares, et de petites superficies. Nous avons considéré le volume de bois sur ce type de faciès comme nul.

6.14 Paysages associés aux vieux dépôts sableux (unités cartographiées P61.1, P61.2)

Ce paysage est dominé par une mosaïque de savanes arborées variables. Grossièrement on peut distinguer :

- les savanes arborées sur sol non hydromorphe
- les savanes arborées sur sol hydromorphe de profondeur
- les formations ripicoles des systèmes importants de mares temporaires.

Les deux premières catégories qui ne sont pas séparables sur l'image satellite seront traitées ensembles :

6.14.1 Les savanes arborées hors des systèmes importants de mare temporaire

* Dans les zones surélevées elles sont dominées par :

Pterocarpus lucens
Grewia bicolor
Combretum glutinosum

Localement le paysage est émaillé de quelques gros pieds de *Bombax costatum*, *Sclerocarya birrea* et *Sterculia setigera*.

Cette végétation est très proche de celle sur cordons dunaires, mais elle est "relativement plus riche".

* Dans les zones dépressionnaires nous trouvons des espèces classiques des sols lourds comme :

Acacia seyal
Ziziphus mauritiana
Anogeissus leiocarpus

Les variations texturales latérales sont souvent d'ordre décamétrique et les deux types sont plus ou moins imbriqués.

La couverture graminéenne est constituée d'une mosaïque complexe d'espèces hygrophiles cantonnées aux dépressions et d'espèces de substrats limono-sableux (*Schoenefeldia gracilis* par exemple).

6.14.2 Les formations ripicoles des mares temporaires (cf. 3)

La proportion relative de ces diverses formations dans le paysage se modifie quand on monte vers le nord où la couverture sableuse s'épaissit et la part des zones hydromorphes diminue :

Domaine bioclimat.	Savanes arborées sur sol non hydromorphe	Savanes arborées sur sol \pm hydromorphe	Mares temporaires
Sa.S	85	15	≤ 1
S. N	65	30	≤ 5

Sa.S : Sahélien Sud
S. N : Soudanien Nord

Le volume ligneux de ces formations est médiocre. à l'exception des mares temporaires :

Savanes arborées sur sols non hydromorphes : 5 à 20 m³/ha
Savanes arborées sur sols \pm hydromorphes : 10 à 20 m³/ha
Mares temporaires : 30 à 50 m³/ha

6.15 Paysages associés aux systèmes dunaires remaniés ou non (unités cartographiées (P71.1 et P71.2))

Dans le nord de la zone inventoriée nous sommes en plein dans les systèmes dunaires. Ces modelés se caractérisent par une couverture sableuse éolienne de plusieurs mètres et par une succession de creux et de bosses orientés (cordons) ou remaniés (mamelons et champs de chablis).

La végétation est une savane arbustive claire largement dominée par le *Combretum glutinosum*. Ici et là nous trouvons quelques grands individus de : *Prosopis africana*, *Bombax costatum*, *Sclerocarya birrea*, *Sterculia setigera*, qui sont bien souvent morts ou dépérissants.

La strate graminéenne est évidemment dominée par les psammophiles et nous avons : *Schoenefeldia gracilis*, *Cenchrus biflorus*, *Eragrostis tremula*, *Aristida spp.*...

Le volume à l'hectare est médiocre voire même très faible. de l'ordre de 10 m³/ha pour une pluviométrie comprise entre 600 et 800 mm/an et de 5 m³/ha, pour une pluviométrie inférieure.

Localement et de façon sporadique certains creux interdunaires présentent des sols à tendance hydromorphe et une végétation dominée par *Acacia spp*, *Ziziphus mauritiana*, *Feretia apodanthera*. etc...

6.16 Paysages associés aux paléovallées (unité cartographiée P81.1)

Dans la partie nord du pays on rencontre des paléovallées dont la plus représentative est la vallée du Serpent (qui traverse le Cercle de Nara).

La partie qui nous concerne est largement ensablée et donc couverte par une végétation plus psammophile qu'hygrophile.

La formation végétale dominante est une savane arbustive pauvre composée presque essentiellement des espèces suivantes : *Combretum glutinosum*, *Acacia spp*, *Pterocarpus lucens*, *Grewia bicolor*. ...

A la faveur de conditions locales particulières, nous avons tout de même trouvé une végétation plus hygrophile dominée par : *Acacia seyal*, *Piliostigma reticulatum*.

La formation est originellement pauvre et de plus très dégradée car elle constitue un parcours de choix pour le bétail. Le volume des ligneux ne dépasse qu'occasionnellement les 15 m³/ha et avoisine souvent les 5-10 m³/ha.

6.17 Paysages associés aux systèmes des plaines alluviales du delta du Niger (unités cartographiées P91.1, P92.1, P93.1, P94.1, P95.1, P96.1, P03.1, P04.1, P05.1 et P06.1)

Il existe trois grandes unités caractéristiques de cette zone, comprenant chacune un certain nombre de faciès morphopédologiques différents :

- les plaines alluviales anciennes du delta mort
- les plaines alluviales inondables du delta vif
- les zones exondées du delta

6.17.1 Plaines alluviales anciennes du delta mort

a) Plaines affectées par des dépressions marquées (unité P91.1)

Dans ce cas nous avons affaire à un système de savane arborée à boisée suivant que l'on se trouve sur les buttes sableuses ou dans les dépressions argilo-limoneuses.

Dans les zones dépressionnaires nous trouvons des essences caractéristiques des sols lourds tels que :

- *Acacia seyal*
- *Anogeissus leiocarpus*
- *Mitragyna inermis*
- *Combretum micranthum*

Les volumes sont compris entre 10 et 50 m³/ha en fonction de l'importance des dégradations anthropiques.

Les buttes sableuses sont occupées principalement par :

- *Combretum glutinosum*
- *Piliostigma reticulatum*
- *Vittelaria paradoxa*
- *Grewia flavescens*

Les volumes peuvent atteindre 5 à 10 m³/ha.

b) Basses plaines : (unité P92.1)

Il s'agit de plaines dépressionnaires ou ondulées affectées par des engorgements saisonniers (en hivernage) suivis de phases de dessiccation (en saison sèche).

Sur les plaines dépressionnaires se développe une savane arbustive armée représentée par un peuplement hétérogène d'arbres et d'arbustes en formation régulière et continue.

On y rencontre principalement :

- *Acacia seyal*
- *Anogeïssus leiocarpus*
- *Dichrostachys cinerea*
- *Grewia bicolor*

Sur les plaines ondulées se développe une savane arborée claire, à peuplement hétérogène d'arbres et d'arbustes en formation discontinue et irrégulière parfois dégradée.

On y trouve principalement :

- *Anogeïssus leiocarpus*
- *Acacia seyal*
- *Balanites aegyptiaca*
- *Guiera senegalensis*
- *Combretum glutinosum*

Dans les deux cas les volumes rencontrés sont compris entre 10 et 20 m³/ha en fonction des conditions stationnelles.

c) Plaines affectées par des dépressions peu marquées (unité P93.1)

Ces plaines sont exondées, et les dépressions sont irrégulières et à engorgement limité. On y rencontre une végétation ligneuse sous forme de savane arborée dont les principales essences sont :

- *Guiera senegalensis*
- *Piliostigma reticulatum*
- *Sclerocarya birrea*
- *Grewia bicolor*

Les volumes varient suivant que l'on se trouve dans les dépressions ou sur les zones totalement exondées. Ils peuvent être nuls sur les "bosses" et atteindre 25 m³/ha dans les dépressions.

d) Plaines sableuses (unité P96.1)

Il s'agit de formations sableuses sur sols profonds, bien drainants en surface mais à circulation lente en profondeur.

Sur ce type de faciès se développe une savane arborée composée d'arbres et d'arbustes en formation plus ou moins hétérogène et discontinue et comprenant les essences suivantes :

- *Combretum micranthum*
- *Grevia flavescens*

Les volumes sont compris entre 10 et 15 m³/ha.

6.17.2 Plaines alluviales inondables du delta vif

Dans ce paragraphe nous décrivons les plaines alluviales du delta vif du Niger, ou plus exactement la zone intermédiaire inondable entre le delta vif (inondé une grande partie de l'année) et le delta mort (inondé moins régulièrement et surtout en fonction de la quantité d'eau tombée en hivernage). Dans cette zone intermédiaire les limites morphopédologiques qui apparaissent au moment de l'exploitation des images satellite fluctuent d'une année à l'autre en fonction de la pluviométrie et sont donc aléatoires. Les paysages végétaux décrits ci-après sont donc des paysages "types" qui peuvent apparaître beaucoup plus complexes sur le terrain du fait de la variation quasi annuelle de l'amplitude des inondations.

Parmi les différentes unités morphopédologiques de cette zone on trouve quatre types de faciès :

a) Basses plaines (unité P03.1)

Sur ces dépôts alluviaux se sont développés des sols profonds à texture fine et à mauvais drainage (gley dès la surface).

Ces zones sont inondées chaque année, parfois même tout au long de l'année.

Sur ce type de faciès on ne trouve pas de ligneux. Seule se développe une végétation herbacée dont la composition varie suivant que l'on se situe en période d'inondation (*Echinochloa stagnina*, *Oryza longistaminata*, *Vossia cuspidata*), ou en période de décrue (*Scirpus praelongatus*, *Cyperus* spp).

b) Plaines alluviales dominant les plaines de l'unité précédente (unité P04.1)

Ces plaines ont le même type de sol que l'unité précédente et comme elles, sont la résultante de dépôts alluviaux. Elles sont cependant situées, du point de vue topographique, au dessus de ces dernières. Elles sont actuellement hors de la zone d'influence des crues ce qui a permis le développement d'une régénération d'espèces pionnières telles que :

- *Piliostigma reticulatum*
- *Guiera senegalensis*
- *Calotropis procera*

La végétation herbacée est dominée par *Vetiveria nigritana* en général mélangé à des graminées vivaces comme *Hyparrhenia rufa*, *Eragrostis barteri*, *Andropogon gayanus*.

Les volumes actuels peuvent être considérés comme nuls, mais pourraient devenir significatifs si les conditions de sécheresse se maintenaient au stade actuel (baisse importante de l'amplitude des crues).

c) Chapelets de mares (unité P05.1)

Cette unité est caractérisée par une succession de dépressions plus ou moins importantes à engorgement saisonnier sévère. Ces mares se situent systématiquement sur les basses plaines décrites plus haut.

Dans ces mares et sur les buttes se développe une végétation ligneuse pauvre et très hétérogène qui s'est installée à la faveur de périodes relativement sèches.

On y rencontre essentiellement :

- *Piliostigma reticulatum*
- *Guiera senegalensis*

et les volumes dépassent rarement 5 m³/ha.

d) Plaines ou haut-fonds dans la zone de battement des crues (unité P06.1)

Ce faciès se localise en limite de la zone de battement des crues.

On passe graduellement des basses plaines aux haut-fonds désormais exondés. La végétation ligneuse y est quasiment inexistante avec parfois quelques taches de régénération très diffuses d'espèces pionnières telles que *Piliostigma reticulatum* ou *Guiera senegalensis*.

Sur ces sols lourds à gley en profondeur se développe une strate herbacée composée essentiellement de :

- *Eragrostis barteri*
- *Andropogon caniculatus*

6.17.3 zones exondées du delta

On retrouve ces types de paysage à la fois dans le delta vif et dans le delta mort. Ils se sont développés sur d'anciens dépôts alluviaux et ont la particularité de n'être jamais inondés.

a) Complexe des paléovallées : (unité P94.1)

Il s'agit là d'anciens axes de drainage, sur sols profonds, argileux, à drainage bloqué dès la surface, très engorgés en hivernage.

Sur ces axes on note la présence de cuvettes dans lesquelles se développe une savane arbustive armée, localement arborée. Nous avons affaire à un peuplement hétérogène d'arbustes en formation assez régulière et continue.

On y rencontre principalement des essences comme :

- *Acacia spp*
- *Anogeissus leiocarpus*
- *Combretum spp*

Les volumes varient de 10 à 30 m³/ha.

Entre les cuvettes il n'y a pratiquement pas de végétation du fait d'une forte dégradation anthropique, ces axes étant des parcours préférentiels pour le bétail.

b) Plaines d'épandages ou levées de débordement : (unité P95.1)

Nous avons affaire ici à des zones exondées qui résultent des dépôts alluviaux successifs dûs aux débordements du Niger.

Les sols sont en général profonds, à texture variable en surface, plus argileuse en profondeur.

Sur ce type de faciès se développe une savane arbustive : il s'agit d'un peuplement hétérogène d'arbres ou d'arbustes en formation plus ou moins régulière et continue en fonction du degré de dégradation anthropique.

La composition floristique est variable mais on y rencontre presque toujours :

- *Acacia sieberiana*
- *Acacia pennata*
- *Crateva religiosa*
- *Dicrostachys cinerea*
- *Anogeissus leiocarpus*

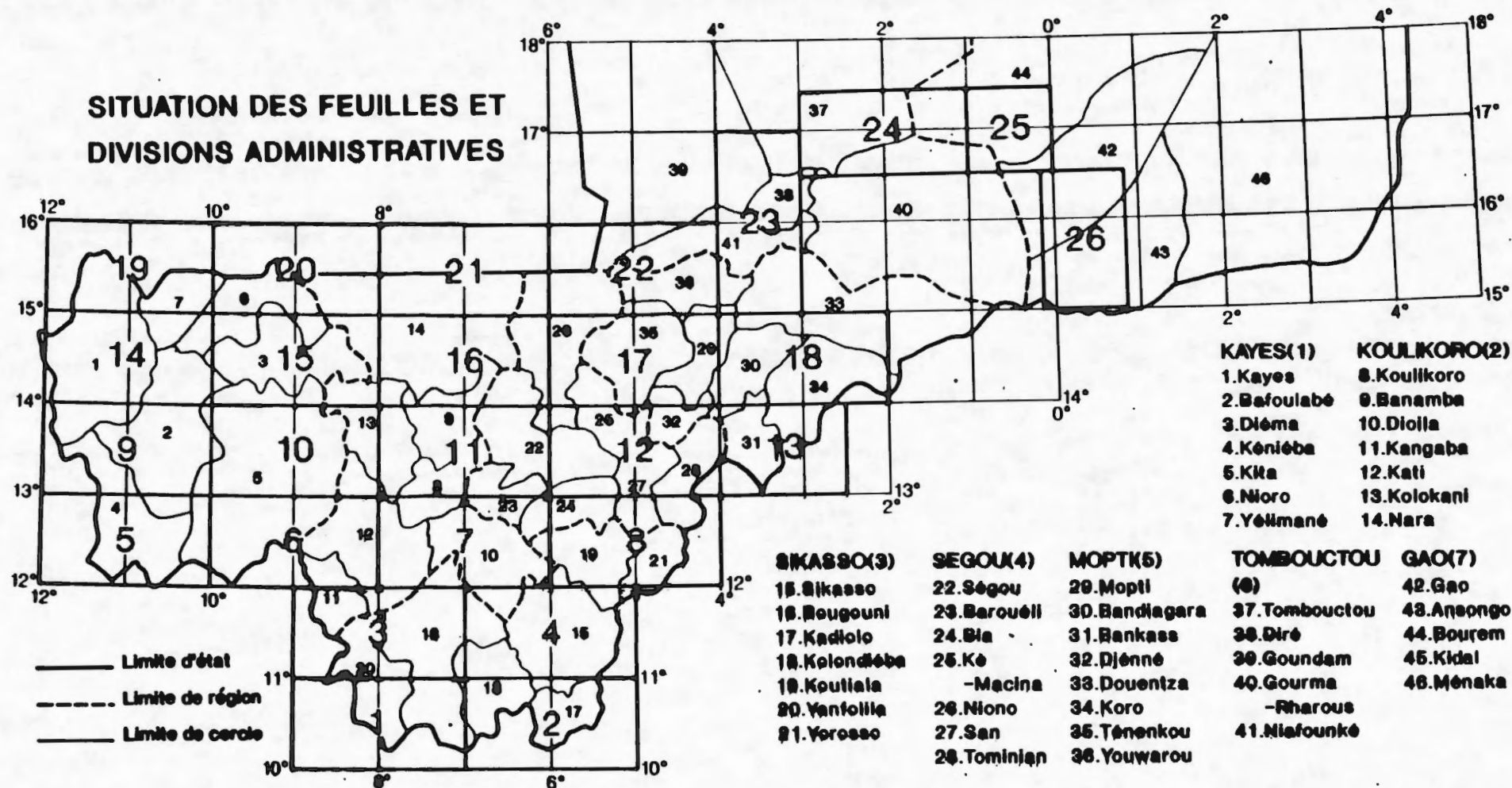
Les volumes varient entre 10 et 20 m³/ha en fonction :

- du taux de dégradation anthropique
- des essences rencontrées.

Chapitre 7

PRESENTATION DES DONNEES DE L'INVENTAIRE, UTILISATION POTENTIELLE ET
CONCLUSIONS

SITUATION DES FEUILLES ET DIVISIONS ADMINISTRATIVES



KAYES(1)	KOULIKORO(2)
1. Kayes	8. Koulikoro
2. Bafoulabé	9. Banamba
3. Diéma	10. Diolila
4. Kénieba	11. Kangaba
5. Kita	12. Kati
6. Nioro	13. Kolokani
7. Yelimané	14. Nara

SIKASSO(3)	SEGOU(4)	MOPTI(5)	TOMBOUCTOU (6)	GAO(7)
15. Sikasso	22. Ségou	29. Mopti	37. Tombouctou	42. Gao
16. Bougouni	23. Barouéli	30. Bandiagara	38. Diré	43. Ansongo
17. Kadiolo	24. Sia	31. Bankass	39. Goundam	44. Bourem
18. Kolondieba	25. Ké - Macina	32. Djénné	40. Gourma - Rharous	45. Kidal
19. Koutiala	26. Niono	33. Douentza	41. Niafounké	46. Ménaka
20. Yanfolila	27. San	34. Koro		
21. Yorosso	28. Tominjan	35. Ténenkou		
		36. Youwarou		

71 Cartographie définitive

711 Cartographie provisoire au 1/200 000°

Elle a été réalisée pour chaque unité administrative du Cercle avec comme base un assemblage au 1/200 000° des extraits des différentes cartes IGN concernant le Cercle.

Le mode de présentation a été choisi à la demande de nombreux utilisateurs qui avaient besoin de données à cette échelle de travail. Il a permis de publier sous forme provisoire dès 1987 des documents au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

Ces documents ont été édités en nombre limité (une dizaine d'exemplaires), en tirage ozalid, coloriés manuellement et archivés à la Direction des Eaux et Forêts à BAMAKO.

712 Edition définitive au 1/200 000°

La présentation des données par Cercle n'a pas été retenue pour l'édition définitive en raison de son coût très élevé, de la difficulté de normaliser des formats cartes de dimension très différente suivant les Cercles.

La cartographie a été donc réalisée de façon classique en suivant le découpage au 1/200 000° de la cartographie du pays.

Pour des raisons d'économie très substantielle au niveau de l'édition, les cartes IGN ont été groupées par 2 (et quelque fois plus) de façon à limiter le nombre total de coupure à 26. Les coupures n° 1 à 22 ont été éditées en deux versions, une pour l'occupation agricole des terres, l'autre pour les formations végétales. Ces deux thèmes ont été rassemblés sur la même carte pour les coupures n° 23 à 26 couvrant la boucle du Niger.

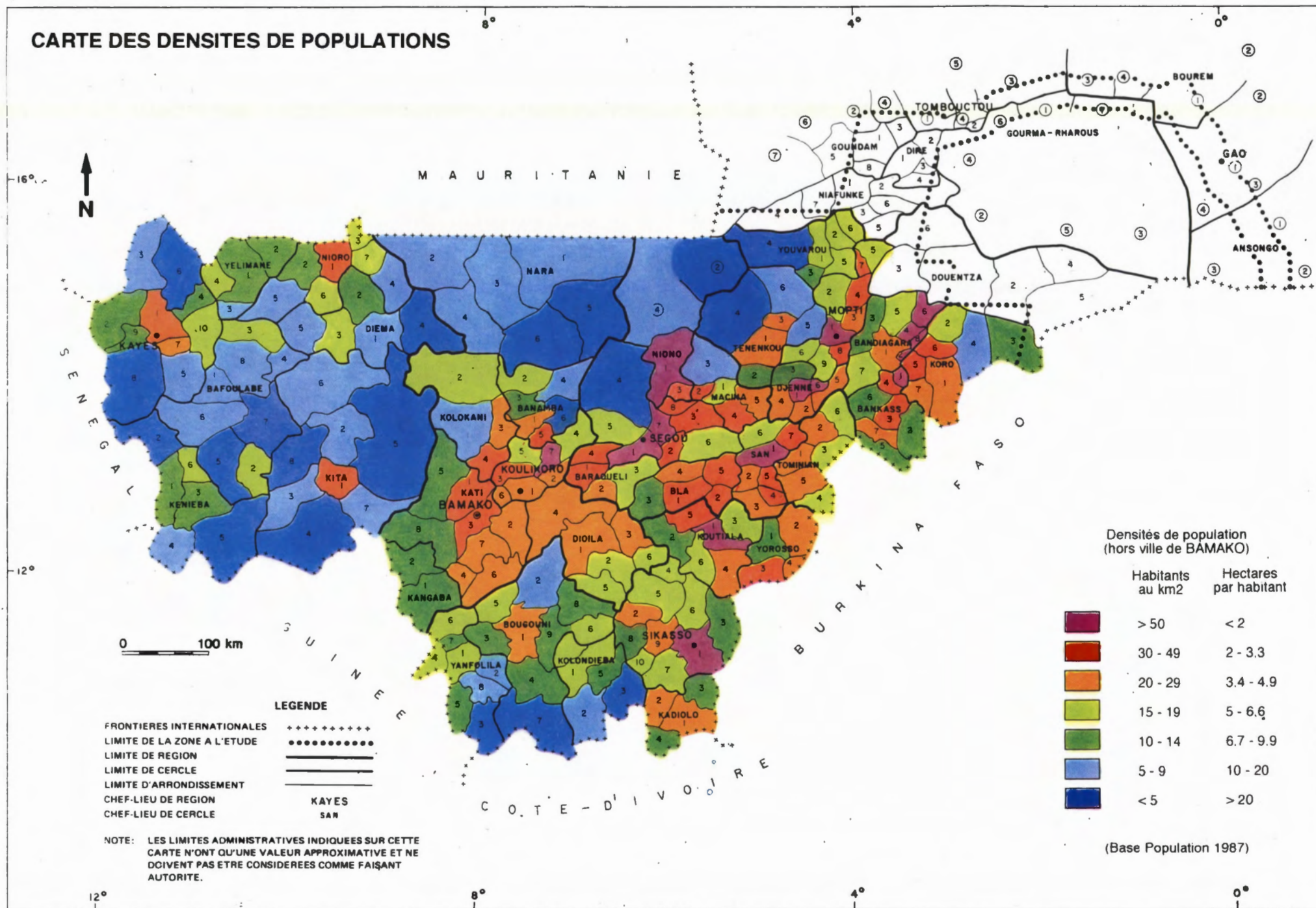
Les cartes ainsi obtenues, ne possèdent pas la qualité d'impression des cartes thématiques réalisées avec des moyens plus élaborés mais dans les conditions du projet ce choix a permis d'éditer des documents en couleur, parfaitement lisibles, à un coût d'environ trois fois moindre.

Les maquettes ont été coloriées à Bamako sur support transparent stable à l'aide de crayons de couleur en teinte à plat ou figurés. Après scannérisation et édition à Paris les documents obtenus reflètent assez fidèlement les maquettes d'origine. Compte tenu du détail de ces cartes le réglage de la scannérisation s'est avéré délicat.

713 Carte de synthèse au 1/1 000 000

Cette carte a été réalisée à partir de la réduction et de l'assemblage de l'ensemble des cartes éditées au 1/200 000°. Ce travail a facilité l'élaboration d'une synthèse par nature délicate en raison de la densité d'information des cartes au 1/200 000°.

CARTE DES DENSITES DE POPULATIONS



72 Présentation des données quantitatives de l'inventaire

Ces données ont été consignées dans un rapport intitulé "Synthèse Régionale" et présentées sous la forme d'une note qui rassemble l'essentiel de l'information recueillie au niveau des unités administratives de chaque Cercle des cinq Régions du Mali complètement inventoriées.

Toutes les données chiffrées sont pour les régions de l'est du pays partiellement cartographiées et dépourvues de contrôle de terrain. Un bilan simplifié est limité aux surfaces occupées par les unités cartographiées sur chacune des coupures de carte et sans référence aux unités administratives.

La note de synthèse rédigée pour chacun des Cercles donne les informations suivantes :

721 La cartographie (cartes à utiliser pour l'étude du Cercle).

722 Climat

Cette donnée est fondamentale pour l'appréciation du contexte bioclimatique de chaque Cercle.

Par souci de synthèse nous nous sommes limités à la présentation des données suivantes :

Le zonage en domaines bioclimatiques présenté sur le Cercle en référence avec les isoyètes calculés sur la période 1922 - 1980. Cette référence a été considérée comme la plus significative quant à la distribution des essences ligneuses et des associations végétales.

Afin de préciser les évolutions climatiques enregistrées ces dernières années et ayant un impact sur la mortalité des essences ligneuses, un tableau indique l'évolution des valeurs pluviométriques moyennes annuelles par décennies depuis 1940 (lorsque les données existent).

Pour les données concernant les températures, les pluviométries moyennes mensuelles et l'évapo-transpiration, on consultera des documents de travail des Notices de Cercle ou les ouvrages spécialisés dans ce domaine.

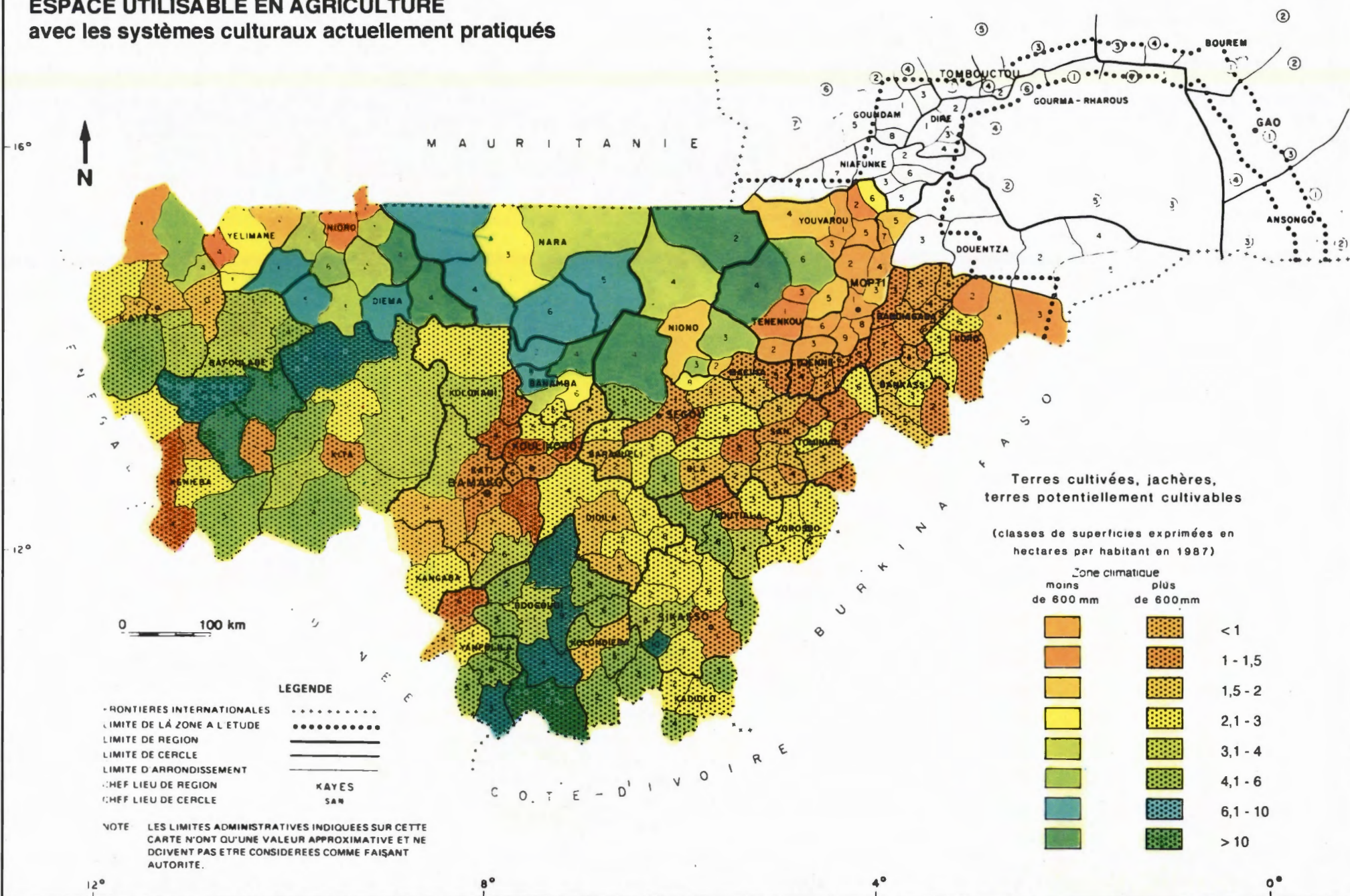
723 Population

Les données de population sont particulièrement importantes dans le cadre de cet inventaire dès lors qu'il s'agit d'apprécier la pression humaine sur les ressources ligneuses ou sur les terres agricoles.

Elles sont présentées dans ce document sous la forme d'un tableau qui indique pour chaque Arrondissement.

- La population 1987 (données provisoires du recensement localement un peu différentes des chiffres définitifs)
- La densité de population en 1987
- L'accroissement de la population entre le recensement de 1976 et celui de 1987.

ESPACE UTILISABLE EN AGRICULTURE avec les systèmes culturaux actuellement pratiqués



Ces chiffres concernent la population totale (urbaine et rurale). seules les villes les plus importantes ont été identifiées séparément (Bamako, Mopti, Ségou).

Un certain nombre d'indicateurs de la pression humaine sur l'environnement ont pu être calculés à partir du recensement de 1987 et des résultats obtenus dans le cadre de cet inventaire.

724 Ressources en terres agricoles

a) Principaux systèmes d'occupation agricole des terres cartographiées et superficies correspondantes

Ce paragraphe décrit les caractéristiques des systèmes représentés dans le Cercle et les superficies correspondantes (celles-ci incluent toujours un certain pourcentage non précisé de jachères et de terres incultes).

b) Estimation de la réserve en terres agricoles potentiellement cultivables avec les systèmes d'occupation agricole des terres pratiquées

Cette notion de réserve en terre se réfère aux critères suivants :

- les systèmes agricoles pratiqués traditionnellement dans le Cercle (quel que soit leur impact sur l'environnement) et le type de terre habituellement utilisé.
- les systèmes agricoles susceptibles d'être développés dans le futur en particulier moyennant les aménagements de contrôle de l'eau.
- l'aptitude des terres (actuellement en majeure partie incultes) à être exploitées par ces systèmes.

La réserve en terre correspond donc à l'espace inculte susceptible d'être occupé par l'agriculture et ses jachères afin de satisfaire les besoins en terres qui résulteront de la croissance démographique et/ou des transmigrations spontanées qui affectent certaines régions.

L'aptitude des terres à satisfaire cette demande a été appréciée à partir de l'esquisse morphopédologique réalisée dans le cadre de cet inventaire. L'information a été complétée par des données de l'Atlas PIRT.

Le niveau de fiabilité de l'appréciation de cette aptitude des terres reste toutefois très sommaire et ne dispense pas des études de sol nécessaires à une cartographie pédologique de base au 1/200 000 ou aux études de factibilité préalables à la mise en valeur des zones humides.

En revanche l'information apportée par les cartes et les données chiffrées permet d'identifier et de localiser les zones présentant un intérêt pour l'agriculture et de limiter l'extension et par conséquent le coût des études à entreprendre.

c) Bilan des ressources en terres (utilisées et potentiellement utilisables)

Le bilan est présenté par rapport à la population recensée en 1987 en surface disponible exprimée en hectare par habitant pour les catégories suivantes :

- surface cultivée en sec et jachères récentes
- surface cultivée des zones humides, bas-fonds et jachères récentes
- réserve en terres cultivables en sec (y compris jachères nécessaires à la reconstitution de la fertilité)
- réserve en terres cultivables en zones humides (sous réserve de disponibilité en eau et/ou des possibilités de contrôle de l'eau)
- surface géographique par habitant (terres cultivées, potentiellement cultivables et considérées comme inaptes à l'agriculture).

Les chiffres présentés doivent être considérés comme des indicateurs. Ils ne fournissent pas les superficies actuellement cultivées chaque année ni les temps de jachère minimum pour assurer la survie des systèmes pratiqués en fonction de la fertilité des sols.

En revanche ces données reflètent assez bien la pression actuelle sur les terres et la pression prévisible à plus ou moins long terme qui résultera de la croissance démographique et des capacités d'accueil de transmigration de population.

725 Ressources ligneuses

Comme pour l'occupation agricole des terres une synthèse est établie sur chaque Cercle avec le détail des données quantitatives présentée au niveau de l'Arrondissement.

Cette synthèse comprend les rubriques suivantes :

- Généralités : contexte écologique des principales formations végétales présentées sur le Cercle.
- Formations végétales non agricoles et superficies correspondantes.
- Volumes moyens sur écorce par unité cartographique.
- Données recueillies sur la mortalité des essences ligneuses.
- Nature des ressources ligneuses : principales essences représentées et utilisation potentielle.
- Ressources ligneuses et population

Ce paragraphe établit un bilan des ressources ligneuses à l'échelle de l'Arrondissement. Ce bilan est présenté de la façon suivante :

- Volume moyen sur écorce toutes espèces confondues à la découpe de 3 cm (total et par habitant).

- Accroissement annuel estimé (AEE). On retiendra que cette estimation repose sur une synthèse des données connues dans ce domaine établie par J. CLEMENT en 1985 et qu'il n'a pas été procédé à des mesures spécifiques d'accroissement annuel dans le cadre de cette étude.

Pour les zones situées en domaine bioclimatique sahélien nord et sud cette estimation est purement hypothétique.

- Accroissement annuel par habitant (AEE/hab).

Cette donnée est exprimée en "moyenne" par rapport à l'ensemble de l'Arrondissement et peut masquer des disparités locales (surexploitation ou sous-exploitation) notamment sur les ressources ligneuses en bois de chauffe dont la collecte varie en fonction :

- de la proximité des zones d'habitat.
- des moyens de transport (manuel, traction attelée),
- des contraintes topographiques d'accessibilité sur le terrain.
- de la commercialisation de bois de chauffe destinée à d'autres populations que celles prises en compte sur l'Arrondissement.

Par ailleurs l'accroissement annuel est exprimé pour toutes essences confondues et certaines essences ne sont pas ou peu utilisées en bois de chauffe. On soulignera les réserves qui doivent être faites sur la validité du coefficient d'accroissement retenu (rareté ou absence de données, impact des variations pluviométriques interannuelles sur la croissance des arbres).

Malgré toutes ces réserves, ce ratio constitue un bon indicateur de pression sur les ressources et reflètent bien les situations de pénurie de bois de chauffe constatées, la surexploitation actuelle ou à brève échéance (c.f. : carte n°).

73 Utilisations potentielles des documents produits par l'inventaire

Les cartes qui fournissent une image assez complète de l'état de l'espace rural ainsi que les données chiffrées intéressent une large gamme d'utilisateur dans le domaine du développement et de la conservation des ressources naturelles.

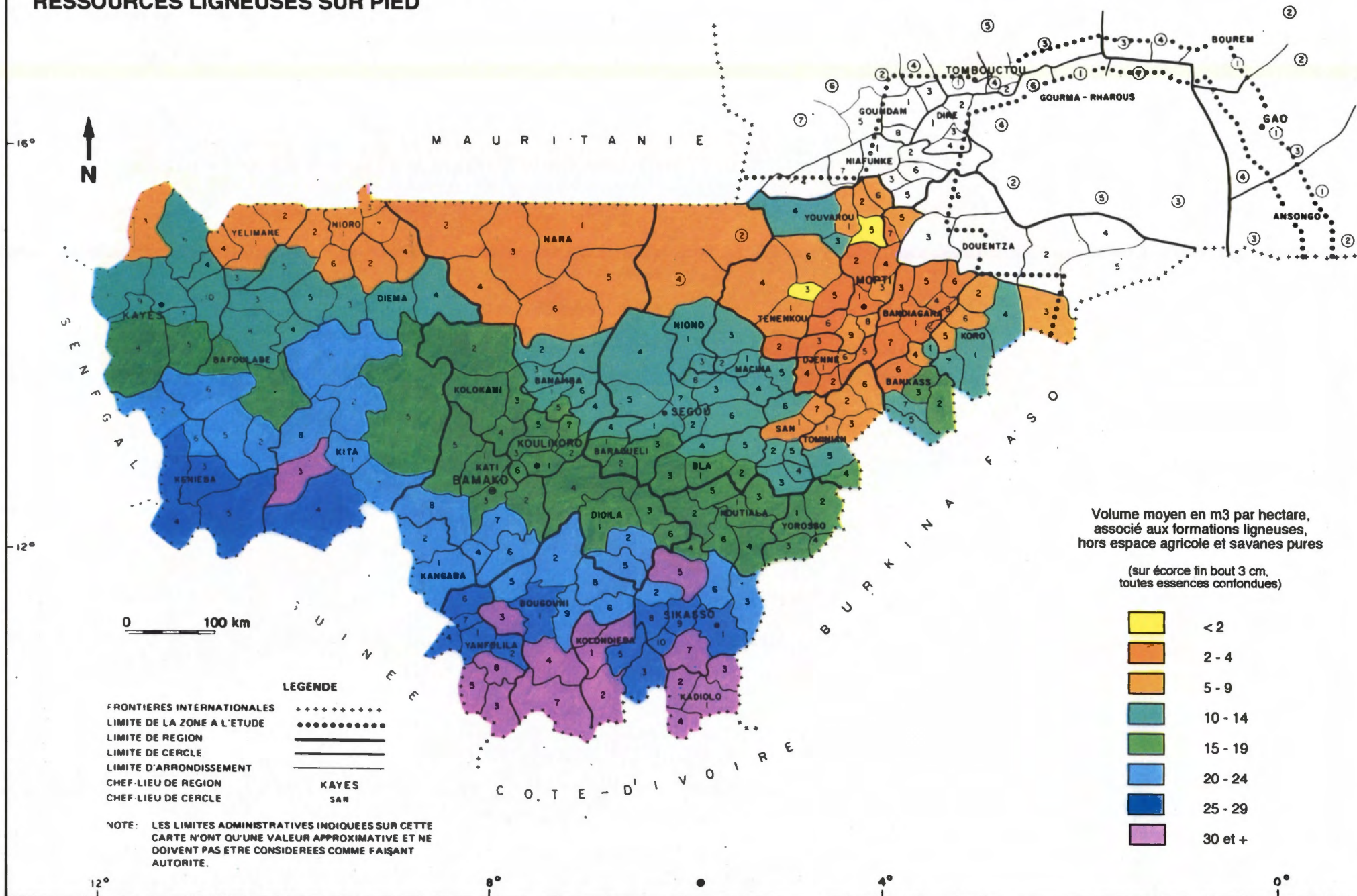
Les principaux domaines concernés sont :

731 La forêt et la gestion des ressources ligneuses.

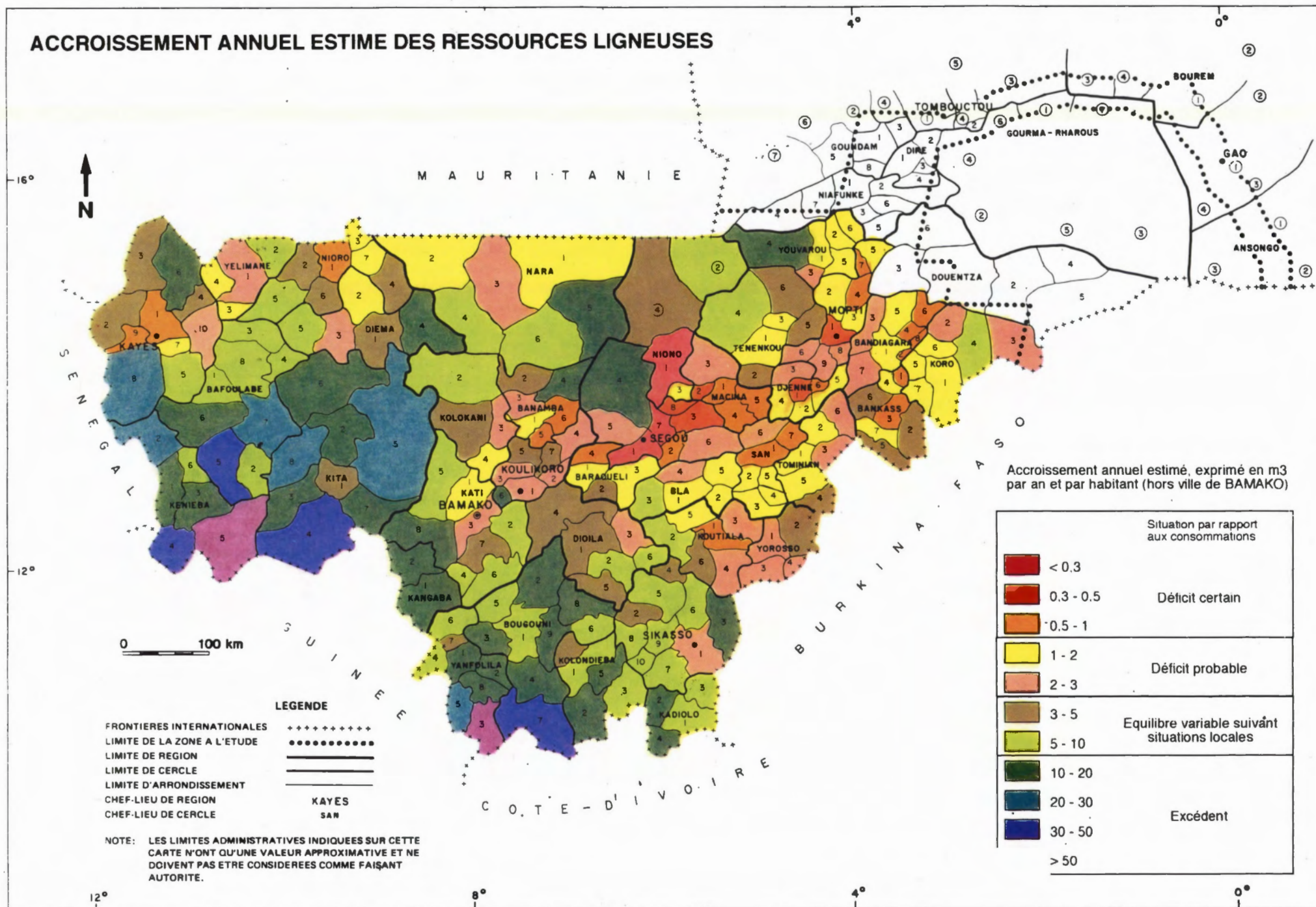
L'inventaire est utilisé à l'échelle de la planification nationale, pour l'identification des régions en situation de pénurie de bois de chauffe et pour la préparation de l'avenir en fonction des projections d'accroissement démographique et des besoins correspondants.

Les données fournies au niveau de l'Arrondissement, quelles que soient leurs limites de précision, comblent une grave lacune dans l'estimation des ressources ligneuses maliennes.

RESSOURCES LIGNEUSES SUR PIED



ACCROISSEMENT ANNUEL ESTIME DES RESSOURCES LIGNEUSES



732 L'élevage le sylvo pastoralisme, hydraulique pastorale

La cartographie des paysages végétaux utilisée pour l'inventaire des ressources ligneuses peut constituer une base de départ pour un zonage agrostologique à l'échelle régionale. Celui-ci bien sûr, doit être complété par l'identification de la strate herbacée associée aux paysages végétaux cartographiés et d'une identification plus complète de la contribution fourragère spécifique des espèces ligneuses.

Les applications prioritaires concernent le sud et l'ouest du Mali peu couverts en cartographie pastorale.

733 Statistique agricole

La carte d'occupation agricole et les principaux systèmes d'utilisation des terres peuvent constituer un document de stratification peuvent être pour la statistique agricole : préparation de recensements généraux ou partiels de l'agriculture, organisation d'enquêtes par sondages et/ou prises de vue échantillonnées. etc...

734 Vulgarisation agricole. équipement rural

Les données de géographie agricole fournies par la carte d'occupation des sols et exploitées par des spécialistes ayant une bonne expérience de la campagne malienne peuvent faciliter les études d'organisation de la gestion du monde rural dans les domaines suivants :

- délimitation de petites régions agricoles homogènes et vulgarisation agricole
- localisation des populations et équipement (besoins en pistes rurales. hydraulique villageoise...)
- prévision des besoins en terres en fonction de la démographie. besoins en intensification de l'agriculture.

735 Génie rural et hydraulique agricole

La carte d'occupation agricole des terres avec la localisation des systèmes agricoles des zones humides et des bas-fonds la délimitation des terres potentiellement utilisables. sous réserve de contrôle de l'eau sont autant d'informations fournies par cet inventaire. Celles-ci peuvent compléter la connaissance dans les zones qui n'ont pas fait l'objet jusqu'ici d'études spécifiques dans ce domaine.

736 Aménagement du territoire, planification

Les cartes produites par l'inventaire font l'objet d'une exploitation destinée à la réalisation d'un Atlas National de l'Aménagement du Territoire.

Les données chiffrées concernant les ressources et les populations actuelles ou projetées sont d'une large application pour tout projet de Schéma Directeur de Développement Régional ou d'identification des priorités.

737 Suivi écologique du territoire

La cartographie au 1/200 000° fournit une stratification détaillée des écosystèmes et l'ensemble des données après numérisation pourrait faire l'objet de la constitution d'un système d'information géographique actuellement à l'étude pour l'ensemble du Mali.

ANNEXE

TRAITEMENTS NUMERIQUES DES DONNEES SPOT

Deux études réalisées, parallèlement aux travaux du PIRL, ont permis d'utiliser les données numériques enregistrées par SPOT sur deux zones-tests inventoriées et cartographiées : Sorondian et Nienendougou : "Spot et Forêt" et "Télédétection Spatiale et Inventaires forestiers".

SPOT ET FORET

1 CONTEXTE DE L'ETUDE

Fin 1988 le CNES et SPOT IMAGE décident de lancer une opération d'aide au développement du marché des produits SPOT et chargent le Laboratoire Commun de Télédétection CEMAGREF/ENGREF de conduire un projet intitulé "SPOT ET FORET" avec pour objectifs :

- l'analyse des besoins : secteur privé, secteur public ; forêt tempérée, forêt tropicale.
- le bilan et l'évaluation des méthodes disponibles
- le développement de méthodologies et de logiciels nécessaires
- la pré-industrialisation des produits et des services
- la définition des actions de mise en oeuvre opérationnelle et de commercialisation des produits et des services.

Cette étude est basée sur l'analyse d'un certain nombre de sites considérés comme représentatifs : les résultats obtenus devant pouvoir être extrapolés à d'autres régions.

Parmi les sites retenus, cinq concernent les forêts tropicales (Mali, Gabon et Burundi).

Au Mali, les travaux réalisés par le BDPA-SCET AGRI, ont porté sur deux zones-tests du PIRL : Sorondian et Nienendougou, toutes deux situées en milieu soudano-guinéen.

2 METHODOLOGIE

La méthodologie adoptée est identique pour les deux zones et consiste à améliorer les images SPOT par des traitements numériques appropriés avant de les interpréter visuellement.

21 Données

- . bandes magnétiques (CCT) SPOT en mode multispectral (XS) enregistrées pendant la saison sèche
 - 21/02/1987 pour Nienendougou
 - 10/01/1987 pour Sorondian
- . photographies aériennes panchromatiques de 1983 au 1/15 000
- . données terrain du PIRL
- . cartes au 1/50 000 des formations végétales des deux zones-tests réalisées par photo-interprétation (1987).

22 Matériel informatique

Les traitements ont été réalisés sur un PC.AT 386/25 équipé d'un logiciel MULTISCOPE et les sorties restituées par un VIZIRCOLOR, matériel d'impression directe sur film au moyen d'un faisceau laser, de la chaîne de traitement MADIRAN.

23 Procédure

Suite à une étude sur la forêt de la Kibira (Burundi) il est apparu que des compositions colorées améliorées, par rapport aux documents standards souvent peu ou mal adaptés aux exigences du thématique, donnaient les meilleures possibilités d'interprétation pour un inventaire à moyenne échelle (1/50 000 - 1/100 000).

Il a donc été décidé d'adopter la méthode suivante :

- réalisation de la meilleure composition colorée possible ; restitution sur un film photographique (VIZIR) et tirage sur papier photographique au 1/50 000.
- l'interprétation visuelle d'une zone d'environ 9 x 9 km par les experts du PIRL au Mali avec références aux documents pré-cités.
- analyse des résultats.

3 NIENENDUGOU

Deux types de traitement ont été appliqués sur les bandes spectrales (canaux) XS₁, XS₂, XS₃ :

- l'analyse en composantes principales (ACP) permettant d'extraire le maximum d'information contenue dans chacun des canaux
Les deux premières composantes fournissent l'essentiel des renseignements (environ 95%) :
ACP₁ correspondant aux réflectances des sols et
ACP₂ à celles de la végétation.
- la décorrélation de canaux (DEC)

En combinant les nouveaux canaux obtenus, par ACP et DEC, deux exemples de composition colorée (CC) ont été testés.

Composante	Rouge	Verte	Bleue
CC standart	XS3	XS2	XS1
CC1	XS3	DEC2	ACP1
CC2	ACP2	ACP1	DEC2

La combinaison CC2, visuellement plus satisfaisante, pour la délimitation de la végétation a été retenue.

Le film obtenu au 1/200 000 par le restituteur VIZIRCOLOR a été agrandi sur papier au 1/50 000.

L'interprétation visuelle d'une zone d'environ 9 x 9 km a permis d'individualiser les thèmes suivants :

- forêts claires à *Isobertlinia doka* (FC)
- formations boisées (forêt claire dégradée et savane boisée) (FB)
- formations herbeuses des plaines alluviales (FH)
- savanes herbacées hygrophiles des marigots (SH)
- bowé (B)
- cultures, jachères.

Pour vérifier les résultats obtenus, cette interprétation a été comparée à la carte des formations végétales de la zone test de Nienendougou réalisée dans le cadre du PIRL en opérant certains regroupements à l'intérieur de la légende (cf. page).

Thèmes (image SPOT)	Unités cartographiques (photos aériennes)
FC	14
FB	15, 21, 22, (25)
FH	11, 12
SH	13
B	23

DESCRIPTION DES UNITES CARTOGRAPHIQUES (PIRL)

ZONE - TEST DE NIENENDOUGOU

NUMERO Légende Symbologie	FORMATIONS VÉGÉTALES	h donnée mètre	nb. points sur carte mètre	ESSENCE INDICATRICES	LOCALISATION MORPHOLOGIQUE DES FORMATIONS VÉGÉTALES
41	Peuplement par de veliver en formation dense			Veliver apricine	Colonise les alluvions meubles du Baculi et du Bégou
42	Savane herbacée dominée localement par une strata arborescente basse, en formation ouverte			Gerardia torrefacta. Scleria maritima pau.	Colonise les bords de berge et les bords avancés des alluvions du Baculi et du Bégou.
43	Savane herbacée hygrophile, localement peuple formations ligneuses répandues			Bambusa divers	Colonise les vallées étroites sur alluvions meubles. les formations ligneuses sont localisées sur les bords de berge des margelles moins exposés aux inondations
	Forêt et Forêt répandue en formation formée	43 Forêt	440 (Forêt)	Diospyros alata Diospyros guineensis Scleria maritima pau.	Les Forêts colonisent les versants abrupts. la strata arborescente est localisée de préférence sur la première terrasse du lit mineur du Baculi et du Bégou
44	Forêt claire. Peuplement hétérogène d'arbres et arbustes en formation continue parfois très dense. Tapis graminéen en formation continue. Dégradation anthropique importante, cultures et systèmes de jachères.	43 5 43	475 5 375	Isobornia doka. Mopani togolensis	Colonise les glaces colluvies sur mor- vaines hétérogènes, affectant l'altitude forêt des sols (capacité de drainage et fertilité)
45	Forêts de dégradation de l'unité précédente. Peuplement hétérogène d'arbres et arbustes en formation discontinue (colonisation anthropi- que très ancienne et récente) Tapis graminéen en formation continue.	40 5 41	400	variété men: Isobornia doka Mopani togolensis Combretum glaberrimum acacia doka...	
21	Forêt claire. Peuplement hétérogène d'arbres et arbustes en formation continue. Tapis graminéen en formation continue.	43	320	Isobornia doka Pennisetum setosum Folia. Pennisetum setosum	Colonise les massifs tabulaires coiffés d'une terrasse sur sols moyennement profonds (40 cm) à texture argilo-sableuse à argilo-limoneuse sur démantèlement généralisé de la terrasse
22	Savane boisée. Unité regroupant des forêts de dégradation anthropique et des bords arborescents. Peuplement très hétérogène d'arbres et arbustes en formation très discontinue. Tapis graminéen en formation discontinue.	43	450	Isobornia doka Pennisetum setosum Acacia doka...	Même situation topographique que l'unité précédente. Mais les caractéristiques pédologiques sont différentes, la texture est à dominante sableuse.
23	Savane typiques. graminées en formation discontinue alternant avec des plages de sol nu. localement présence d'arbres ou arbustes			Combretum spp. Lantana spp.	Généralement même situation topogra- phique que les 2 unités précédentes. Recouvrement superficiel humide-sableux sur démantèlement généralisé de la terrasse.
24	Mêmes caractéristiques que l'unité 21. Tapis graminéen en formation discontinue			Isobornia doka Pennisetum setosum Folia.	Colonise en frange les versants des plateaux sur éboulis mixtes de blocs de granite et de son démantèlement généralisé.
25	Forêts de dégradation anthropique. Région arborescente, cultures et systèmes de jachères.				
31	Rochers à nu. localement présence de quelques arbustes.				Isobornia granitique.

Le document résultant de la superposition des deux cartes constitue la base de l'évaluation quantitative des résultats.

Une matrice de confusion construite à partir de la comparaison des surfaces des thèmes évaluées par planimétrage donne les tableaux ci-dessous.

MATRICE DE CONFUSION EN VALEURS ABSOLUES (superficies en ha)

		CARTOGRAPHIE IMAGE SPOT				
		FC	FB	SH	FH	
UNITES CARTOGRAPHIQUES Photo Interprétation	14	3 281	544			3 825
	15, 21, 22 (25)	1 575	1 169	87	69	2 900
	11, 12	12	44	158	25	237
	13	31	69		1 662	1 787
	Bowé		131			131
	TOTAL 8 880	4 899	1 957	268	1 756	8 880

Cette comparaison d'ordre purement statistique fait apparaître :

- une surestimation des forêts claires (+28%)
- une superficie insuffisante pour les formations boisées (environ 950 ha en moins sur 2 900 ha)
- par contre une excellente estimation si on regroupe les deux thèmes forestiers (6 856 ha et 6 725 ha)
- de bons résultats pour les savanes herbeuses et les formations herbacées des plaines alluviales.

MATRICE DE CONFUSION EN %

		CARTOGRAPHIE IMAGE SPOT			
		FC	FB	SH	FH
UNITES CARTOGRAPHIQUES Photo Interprétation	14	67 %	28 %		
	15, 21, 22 (25)	32 %	60 %	33 %	4 %
	11, 12	0,5 %	2 %	58 %	1 %
	13	0,5 %	3 %	9 %	95 %
	Bowé		7 %		
		100 %	100 %	100 %	100 %

- . 2/3 du thème forêt claire se retrouvent sur les deux cartes et il y a une confusion non négligeable avec les formations boisées.
- . la photo-interprétation de l'image SPOT confond pour 33 % les savanes herbeuses hygrophiles avec les formations boisées.

Le meilleur résultat est obtenu pour les formations herbeuses des plaines alluviales (95 %).

En conclusion cette matrice ne donne pas de résultats très satisfaisants pour les trois premières classes.

4 SORONDIAN

1ère démarche

De la même manière que pour NIENENDOUGOU il y a eu création de nouveaux canaux et la combinaison suivante a été retenue :

Composante	Rouge	Verte	Bleue
CC standart	XS3	ACP1	DEC2

XS3 = bande spectrale du proche infra-rouge

ACP1 = 1ère composante principale

DEC2 = décorrélation du canal XS2.

L'interprétation visuelle de la composition colorée restituée et agrandie au 1/50 000 a individualisé les thèmes suivants :

- formation boisée (FC + FB)
- savanes herbacées des plaines hygrophiles (SH)
- bowé arborés (BA)
- bowé typiques (BT)
- formations herbeuses des plaines d'inondation (FH).

Pour comparer avec la carte des formations végétales de la zone-test de Sorondian, un regroupement des unités cartographiques a dû également être opéré (page) :

Thèmes image SPOT	Unités cartographiques photo-interprétation
FC + FB	13, 14, 15, 21, 22, 23, 24
SH	12
BA	25
BT	26
FH	11

DESCRIPTION DES UNITES CARTOGRAPHIQUES (PIRL)

ZONE-TEST DE SORONDIAN

UNITES CARTOGRAPHIQUES	FORMATIONES VÉGÉTALES	h. m. m.	h. m. m.	ESSENCES INDICATRICES	LOCALISATION MORPHOÉCOLOGIQUE DES FORMATIONS VÉGÉTALES
11	Peuplement pur de sauter en formation dense.			Mulberry argentea	Colonise les alluvions inondables du sud
12	Jouons herbacées hygrophiles, localement présence d'arbres et arbustes.				La formation herbacée colonise les alluvions inondables des marigots secs. Le strate ligneuse est localisée sur les bords escarpés.
	Forêt claire. Arbres à grosses cimes de fort développement en formation dense, dominant un sous-bois riche en bambous et autres arbrassés. Tapis graminéen en formation continue.	18 à 20	250	Artibeus guianensis - Erythrophloeum guianense - Bambusa guianensis - Agave guianensis sp. guianensis	Colonise les bords de berge des marigots les plus importants, sur matériaux bien drainant et profond.
13	Forêt claire, peuplement d'arbres à petites et moyennes cimes en formation hétérogène, dominant une strate arborescente dense. Localement présence de bambous de bords. Tapis graminéen en formation discontinue.	12,5	170	- Labelesia dabo - Parinari - Erythrophloeum guianense - Vitellaria paradoxa	Colonise les glaces colluviales sur matériaux argilo-limono-gravillonneux superficiels, mais bien alimentés en eau.
14	Mêmes caractéristiques que l'unité précédente mais en formation plus claire.	11,5 à 13	150 à 180		
15	Forêt claire identique aux deux formations précédentes mais présentant des caractères de végétation arbustive très importants. Probablement arbustes graminées.				
21	Forêt claire, peuplement d'arbres à petites et moyennes cimes en formation hétérogène, dominant une strate arborescente dense, avec localement du bambou de bords. Tapis graminéen en formation discontinue.	13	150	- Labelesia dabo - Parinari - Erythrophloeum guianense - Bambusa guianensis - Acacia sp. et - Adansia sp. et	Colonise les marais herbacés secs, fci d'une courbe et les collines à courbes sur sol peu profond à gravilles abondantes. Les formations les moins grasses sont localisées sur des sols aquatiques.
22	Jouons arborescentes, peuplement hétérogène d'arbres et arbustes de forte densité. Tapis graminéen en formation discontinue.				
23	Forêt claire, mêmes caractéristiques que l'unité précédente, mais de densité plus importante.	11	200	- Labelesia dabo - Parinari - Erythrophloeum guianense - Bambusa guianensis - Acacia sp. et - Adansia sp. et	Colonise en frange les versants des plateaux surcraissés sur sols min. argileux bruts, démantèlement gravillonneux et nombreux blocs de courbe en éboulis instables.
24	Mêmes caractéristiques que l'unité précédente, mais en formation plus claire.				
25	Jouons arborescentes, peuplement d'arbres et arbustes en formation discontinue alternant avec des plages de sol nu ou de graminées.	10 à 11	200	- Combretum micranthum - Combretum glaberrimum - Combretum fragrans - Miconia monophylla - Phoradendron	Même situation topographique que les 3 unités précédentes. Cependant l'hétérogénéité de ces sols est plus souvent décimétrique. Avec alternance de petits sols forestiers limono-sableux et de courbes de dunes latérales limono-argileuses, et de sols minéraux bruts.
26	Jouons typiques, graminées en formation dense, fci alternant avec des plages de sol nu localement présence d'arbres et arbustes.				En toute position topographique sur sol argilo-limoneux, engorgé en hivernage. Très fortes contrastes de sols.

Comme pour Nienendougou les cartes obtenues ont été comparée et les résultats appréhendés par l'intermédiaire de matrice de confusion.

MATRICE DE CONFUSION EN VALEURS ABSOLUES (superficie en ha)

		CARTOGRAPHIE IMAGE SPOT				
		FC + FB	SH	BA	BT	FH
UNITES CARTOGRAPHIQUES Photo Interprétation	13, 14, 15, 21, 22, 23, 24	5 781	187	138	100	6 206
	12	19	194	6		219
	25	556		1 787		2 343
	26	781		500		1 281
	11		100	6	1 069	1 175
	TOTAL : 11 224	7 137	481	2 437	1 169	11 224

On retrouve dans ce tableau avec SPOT une légère surestimation des surfaces boisées, toutes formations confondues (+ 15 %).

La classe, formation herbeuse hygrophile, est parfaitement définie. Par contre les bowé sont sous estimés (- 33 %) et les savanes herbacées des plaines hygrophiles sont beaucoup trop surestimées.

MATRICE DE CONFUSION EN %

		CARTOGRAPHIE IMAGE SPOT				
		FC + FB	SH	BA	BT	FH
UNITES CARTOGRAPHIQUES Photo Interprétation	13, 14, 15, 21 22, 23, 24	82	39	5,5		8,5
	12	3	40	0,5		
	25	8		73		
	26	10		20,5		
	11		21	0,5		91,5
	TOTAL	100	100	100		100

Cette matrice fait apparaître de bons résultats sauf pour les savanes herbacées des plaines hygrophiles où on note une importante confusion avec des formations boisées, cette formation étant assez souvent sur les buttes exondées couverte par une strate ligneuse.

2ème démarche

Sur Sorondian, une analyse complémentaire s'est attachée à comparer les résultats de deux interprétations (SPOT et photos aériennes) en termes de densité de couvert.

Les données SPOT (10/01/1987) ont été mises sous forme de composition colorée avec les trois bandes suivantes :

XS3 ----> rouge
XS2 décorrélé ----> vert
XS1 décorrélé ----> bleu

Les photographies aériennes appartenant à la mission de 1987 au 1/50 000 ont été interprétées par le CTFT en isolant trois densités de couvert :

< 20 %
de 20 à 40 %
> 40 %

MATRICE DE CONFUSION EN VALEURS ABSOLUES (surfaces en ha)

INTERPRETATION IMAGE SPOT				
	< 20%	20-40%	> 40%	
< 20%	85%	12%	3,5%	
20-40%	11,5%	28%	18,5%	
> 40%	3,5%	60%	77%	
	100%	100%	100%	

INTERPRETATION IMAGE SPOT					
	< 20%	20-40%	> 40%		
< 20%	2375	625	100	3100	
20-40%	325	1375	525	2225	
> 40%	100	3075	2075	5250	
TOTAL	10575	2800	5075	2700	
				10575	
				SPOT = 51%	
				SPOT = 228%	
				SPOT = 90%	

Résultats

- matrice en %
 - . Assez bon classement (85%) des surfaces de densité de couvert < 20 % (pour la plupart : bowé) avec une dispersion vers la classe de densité moyenne.
 - . Résultats insuffisant (77%) pour les boisements denses, et toujours une dispersion vers le taux moyen de couvert.
 - . Très mauvaise (28%) de la classe médiane dont la majorité des surfaces se classent en densité de couvert > 40 %.
- matrice en valeurs absolues (comparaison statistiques)
 - . amélioration (SPOT = 90%) de la classe à faible taux de couvert
 - . confirmation renforcée, des mauvais résultats des autres classes (228% et 51%).

5 CONCLUSION

Malgré des données SPOT prises à une date favorable, pour la détection des formations ligneuses et des traitements d'amélioration des images à interpréter, il a été nécessaire de regrouper les thèmes boisés pour obtenir des résultats jugés corrects.

L'étude réalisée à partir des densités de couvert ligneux démontrent que les meilleurs résultats sont obtenus pour les formations les moins riches en ligneux.

Nous savons que la cartographie des boisements en zone tropicale sèche est un thème difficile à appréhender correctement avec les données satellitaires et dans ce type de milieu les difficultés sont accentuées du fait de l'hétérogénéité constante de la répartition des arbres et des arbustes.

Actuellement, donc, le seul moyen d'augmenter la précision des résultats dans le domaine est d'avoir recours au maximum de données et de combiner si possible diverses procédures.

TELEDETECTION SPATIALE ET INVENTAIRES FORESTIERS

Trois organismes ont participé à cette recherche (1987-1989) :

- Le Centre Technique Forestier Tropical (CTFT/CIRAD) : Programme Aménagement Forestier
- L'Institut Géographique National
- L'Inventaire Forestier National - Antenne Recherche.

Outre la participation de ces trois organismes, le financement provient principalement du CNES et d'une aide du Ministère de la Coopération pour l'achat des données SPOT et pour une partie de leur traitement.

1 OBJECTIFS DE CE PROGRAMME DE RECHERCHE

Les formations forestières sèches africaines n'ont historiquement pas bénéficié du même intérêt financier que les forêts denses et sont par conséquent encore moins bien connues. Le processus de désertification et la pénurie en bois de feu qui apparaît dans certaines régions ont mis en lumière ces dernières années le rôle essentiel de ces formations pour la survie des pays sahéliens. Cependant, beaucoup d'éléments restent à connaître en vue de les gérer rationnellement et de les protéger : leur extension et la rapidité de l'évolution de leur superficie, leur qualité et leur productivité.

Cette connaissance passe nécessairement par la réalisation d'inventaires forestiers. Plusieurs stratégies sont possibles en fonction du type d'inventaire à établir : mais le schéma le plus couramment utilisé fait intervenir les 3 étapes suivantes :

- Stratification du peuplement, cartographie, estimation des surfaces.
- Sondages terrain.
- Dépouillements statistiques des données et interprétation des résultats.

Or, les techniques d'inventaire qui ont fait leurs preuves dans le cas des forêts denses ne peuvent pas être transposées sans adaptation au cas des formations mixtes forestières et graminéennes de savane.

Pour les inventaires de formations forestières sèches sur de grandes superficies, il est nécessaire, et c'était l'objet de cette proposition de recherche, de repenser les méthodes d'inventaire en se basant sur des techniques de sondage efficaces (minimiser les coûts à précision donnée, ou maximiser la précision à coût donné) intégrant différents niveaux d'information : sondages au sol, photographies aériennes, images satellitaires, en particulier l'imagerie SPOT.

Les photographies aériennes ont été jusqu'à maintenant les principaux documents utilisés pour la stratification des peuplements avant inventaire mais compte tenu des contraintes liées à leur disponibilité, leur coût et leur délai d'exploitation, les données satellitaires peuvent offrir une alternative, mais il reste à connaître la manière d'intégrer ces informations satellitaires dans un dispositif forestier.

Il convient donc de connaître la cohérence des différents niveaux de perception (sol - photos aériennes - satellite) d'un point de vue thématique d'abord et cartographique ensuite (définition de limites).

Il est alors nécessaire de connaître le degré de liaison entre les variables relevées sur le terrain qu'elles soient qualitatives ou quantitatives (type de peuplement, densité, volume sur pied, etc...), sur photographies aériennes et sur imagerie satellite.

Enfin, en fonction des objectifs de l'inventaire, et donc des paramètres que l'on cherche à estimer, on doit déterminer les variables, qui, à ces différents niveaux, permettent d'apporter la meilleure stratification possible vis-à-vis des ces paramètres.

Les données permettant de répondre à ces trois types de questions seront acquises à partir d'un ensemble de points de sondage situés dans les limites d'une scène SPOT.

L'étude est située sur la zone-test de Sorondian. les résultats acquis ont ensuite été testés sur une autre scène SPOT, située dans la même région écologique = zone-test de Nienendougou.

2 ETUDE DE LA ZONE DE SORONDIAN

21 Trois niveaux d'information

211 Données de terrain

- les sondages réalisés dans le cadre du PIRL pour l'estimation du potentiel ligneux de la région de Sorondian
- la "vérité terrain" menée dans le cadre de cette recherche en février 1988.

212 Photographies aériennes et cartes existantes

- mission MAL, clichés au 1/50 000 du 28/11/1987
- cartes au 1/50 000 PIRL - végétation et morphopédologie.

213 Données SPOT scène n° 040.327

- bande magnétique (CCT) en mode multispectral du 10/12/1986
- compositions colorées au 1/60 000 du 31/03/1986
 - au 1/100 000 du 10/12/1986
 - au 1/100 000 du 10/01/1987

22 Etape essentielle pour un inventaire : la stratification

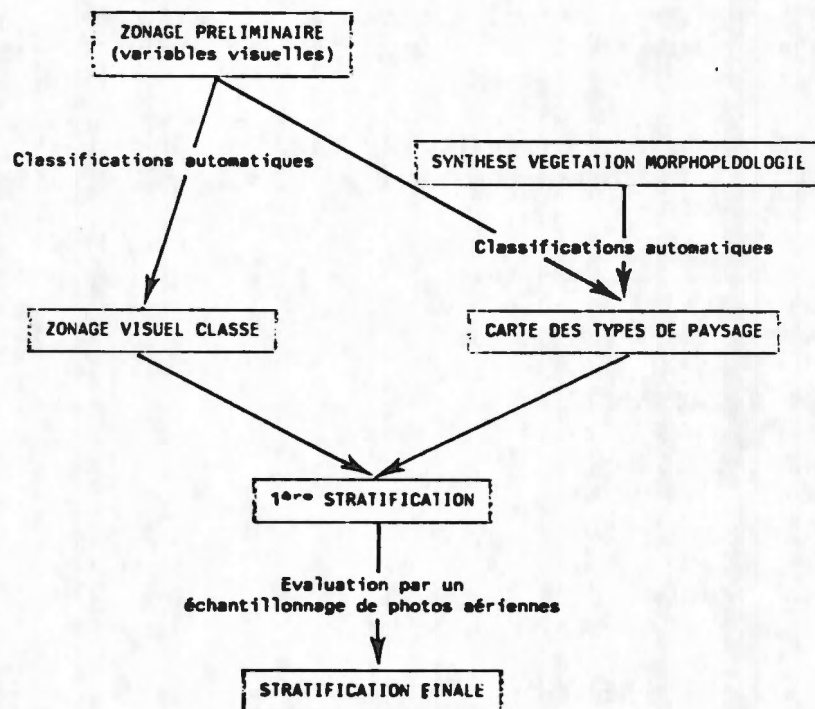
Pour son établissement plusieurs approches complémentaires ont été menées parallèlement :

- analyse visuelle de compositions colorées
- analyse visuelle de documents améliorés
- classification numérique supervisée.

23 Analyse visuelle de compositions colorées

Organigramme

ETAPES DE L'ANALYSE VISUELLE

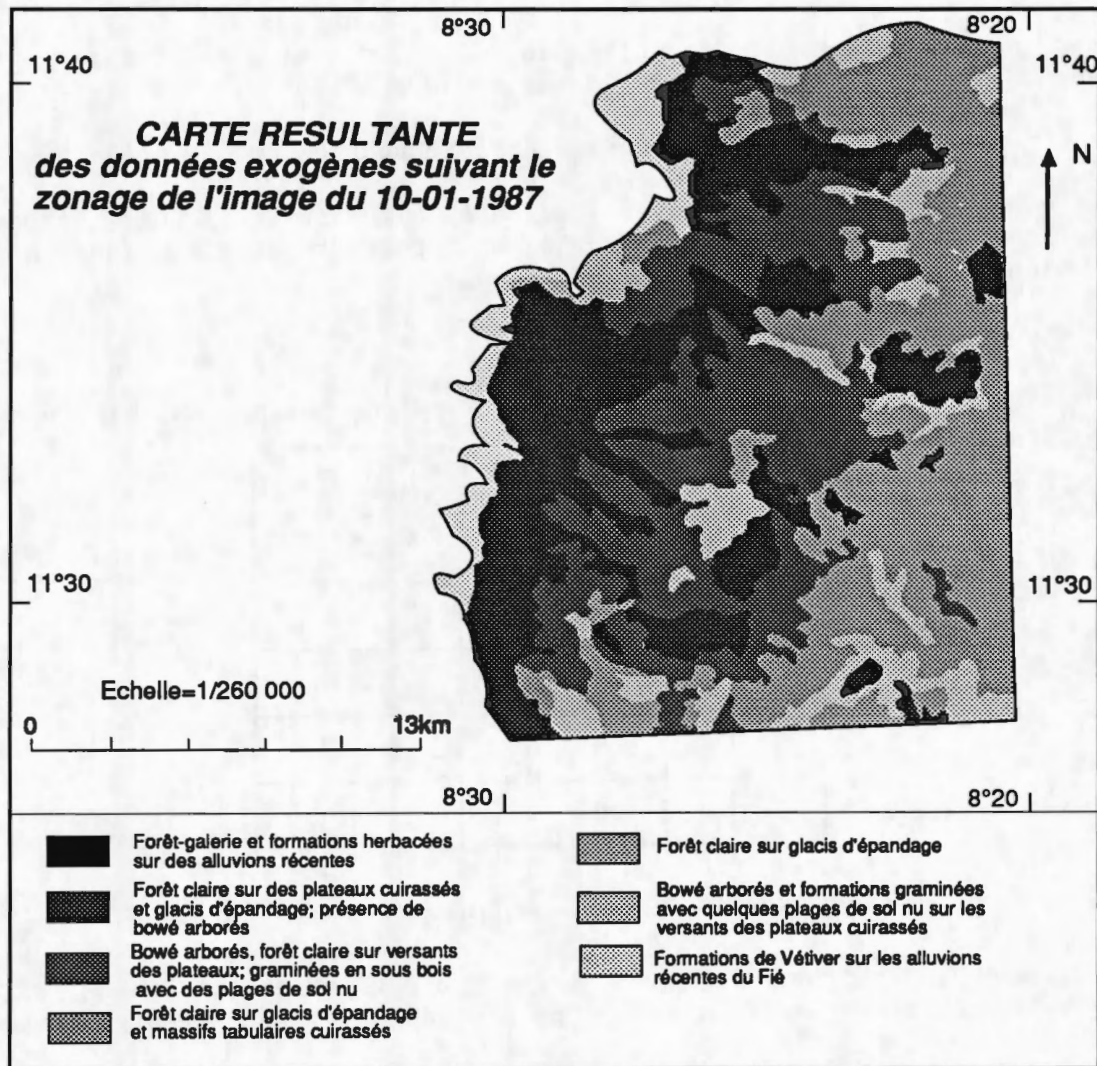


1ère étape : zonage visuel préliminaire.

La méthode repose sur des principes proches de la photo-interprétation et utilise l'analyse de variables visuelles pour découper l'image en unités homogènes.

Les variables concernent la couleur, la texture et une identification thématique préliminaire d'après une connaissance générale de la zone.

ZONES	COULEUR					TEXTURE		IDENTIFICATION PRELIMINAIRE											
	GRAN	VERT	GRAN FORCE	VERT FORCE	BLEU	BLANC	NOIR	LISSE	RUDEUSE	INTERMEDIAIRE	CUIRASSE	PEU CUIRASSE	NON CUIRASSE	VALLEE	TRES AGRICOLE	PEU AGRICOLE	PAS AGRICOLE	VILLAGE HABITATION	EAU



Le tableau obtenu est ensuite classé automatiquement pour obtenir le regroupement des zones présentant les mêmes caractéristiques visuelles.

Deux procédures de classement ont été adoptées :

- classification ascendante hiérarchique
- analyse factorielle des correspondances.

2ème étape : évaluation du zonage.

L'homogénéité du contenu des unités du zonage visuel a été vérifiée avec les deux cartes de la zone-test de Sorondian au 1/50 000 du PIRL.

Dans un premier temps ces deux cartes ont été réunies en une seule.

Ensuite le zonage visuel a été comparé à cette carte de synthèse (végétation - morphopédologie) et après une procédure de classement, nous avons obtenu une carte des types de paysage.

3ème étape : stratification.

Le zonage visuel classé et la carte des types de paysage ont été réunis dans un même tableau :

Classes définies par le zonage visuel classé	Classes définies à partir de la carte des types de paysage							
	x x x x	x			x x x	x x x x x		
		x x	x x x					x x
		x x						
			x x x					
								x x x x

x x x = zones numérotées constituant un groupe

La cohérence thématique de chaque groupe a été vérifiée (référence à la carte de synthèse : végétation - morphopédologie) et éventuellement corrigée.

Le résultat obtenu constitue ainsi la 1ère stratification (voir la carte page suivante).

4ème étape : évaluation de la stratification.

Ce contrôle a été réalisé en analysant le contenu des strates par l'intermédiaire des photographies aériennes, et visualisé sous forme d'histogrammes.

On en déduit qu'en fonction des thèmes que l'on cherche à estimer il peut s'avérer utile de regrouper certaines strates.

Ces histogrammes renseignent sur la variabilité thématique de chacune des strates et par conséquent facilite la mise au point du plan de sondage.

24 Analyse visuelle de documents améliorés

L'objectif de cette 2ème approche a été d'apprécier dans quelle mesure les données SPOT peuvent permettre le classement des peuplements forestiers selon le seul critère de densité de boisement.

Les formations forestières ouvertes qui dans ces régions couvrent de vastes superficies, posent des problèmes particuliers d'inventaire et de cartographie, leur caractérisation sur image numérique engendre également des problèmes spécifiques.

241 Méthodologie

- Les photographies aériennes de la mission MAL 097 au 1/50 000 du 28/11/1987 correspondant à la zone sélectionnée ont été interprétées sur des critères de densité de boisement :
 - > 40% regroupant les forêts galeries et les forêts claires
 - de 20 à 40% correspondant surtout aux savanes boisées
 - < 20% savanes arborées et bowé typiques ou arborés.

242 Les traitements numériques appliqués aux données SPOT XS ont permis de réaliser des améliorations d'images en vue d'une interprétation visuelle des compositions colorées résultantes.

Deux améliorations réalisées sur le matériel IBM du CNUSC à Montpellier - Logiciels Hlips et Stimdi ont été retenues :

- une CC de type infra-rouge couleur avec étalement optimal des histogrammes et réhaussement du contraste local. (CC.IRC)
- une CC en mode luminance-couleur des deux premières composantes principales après étalement différentiel des histogrammes (CC.ACP).

Le choix de ces deux types d'amélioration a été déterminé par le souci d'obtenir un résultat optimal sur l'ensemble du secteur étudié.

243 L'interprétation visuelle des compositions colorées, d'après des critères radiométriques : couleur, intensité, contraste, mais également texturaux : forme, dimension et situation relative des objets les uns par rapport aux autres, a été reportée sur un fond de carte et comparée à celle issue de la photo-interprétation, reflet de la réalité des peuplements à la date considérée.

Les différences constatées ont été quantifiées par grille de point et les matrices de confusion sont reproduites page .

L'évaluation des résultats donnent :

- Sur le plan statistique on constate tout d'abord :

. Une sous estimation de la superficie de la forêt (forêt-claire + savane boisée)

de : 10,2 % sur la CC.IRC
et de : 2,8 % sur la CC.ACP

. quant au système des bowé / savane arborée sa surface est estimé :

à : + 6,6 % sur la CC.IRC
et : - 7,4 % sur la CC.ACP

MATRICE DE CONFUSION

TABLEAUX 1 et 2

Types de boisement	CC.IRC PI	- 2	2-4	+ 4	Feu	TOTAL PI
Bowé + sav.arb	- 2	102 23.6%	13 3	6 1.4		121 28%
Savanes boisées	2 - 4	13 3	58 13.4%	16 3.7	3 0.7	90 20.8%
Forêts claires + " galerie	+ 4	14 3.2	68 15.7	119 27.5%	21 4.8	222 51.2%
	TOTAL CC	129 29.8%	139 32.1%	141 32.6%	24 5.5%	433 100%

Types de boisement	CC.ACP PI	- 2	2-4	+ 4	Feu	TOTAL PI
Bowé + sav.arb	- 2	92 21.3%	24 5.5	5 1.2		121 28%
Savanes boisées	2 - 4	15 3.5	50 11.5%	23 5.3	2 0.5	90 20.8%
Forêts claires + " galerie	+ 4	5 1.2	98 22.6	103 23.7%	16 3.7	222 51.2%
	TOTAL CC	112 26%	172 39.6%	131 30.2%	18 4.2%	433 100%

Tableau 1 - % de bien classés par rapport à la surface totale.

Types de boisement	CC.IRC PI	- 2	2-4	+ 4	Feu	TOTAL PI
Bowé + sav.arb	- 2	102 84.3%	13 10.7%	6 5%		121 100%
Savanes boisées	2 - 4	13 14.4%	58 64.5%	16 17.8%	3 3.3%	90 100%
Forêts claires + " galerie	+ 4	14 6.3%	68 30.6%	119 53.6%	21 9.5%	222 100%
	TOTAL CC	129 +6.6%	139 +54.4%	141 -36.5%		

Types de boisement	CC.ACP PI	- 2	2-4	+ 4	Feu	TOTAL PI
Bowé + sav.arb	- 2	92 76%	24 19.8%	5 4.2%		121 100%
Savanes boisées	2 - 4	15 16.7%	50 55.6%	23 25.5%	2 2.2%	90 100%
Forêts claires + " galerie	+ 4	5 2.3%	98 44.1%	103 46.4%	16 7.2%	222 100%
	TOTAL CC	112 -7.4%	172 +91.1%	131 -41%		

Tableau 2 - % de bien classés par rapport à la photo-interprétation.

- 2 = moins de 20% de densité de boisement
 2-4 = de 20 à 40% " "
 + 4 = plus de 40% " "

. Enfin et surtout, on constate :

une surestimation de la classe savane boisée de + 54,4% pour la CC.IRC
+ 91,1% pour la CC.ACP

une sous-estimation de la classe forêt claire de - 36,5% pour la CC.IRC
- 41,0% pour la CC.ACP

- Sur le plan cartographique, les forêts claires et les savanes boisées n'ont été correctement identifiées globalement :

qu'à 56,7 % sur la CC.IRC
et 49,0 % sur la CC.ACP.

Sur la CC.IRC par exemple, les savanes boisées ont été beaucoup mieux identifiées en zone nord (72,5 %) qu'au sud (53,8 %).

Sur la CC.ACP c'est la forêt claire qui a été mieux identifiée au sud (53,2 %) qu'au nord (39,6 %).

Sur l'ensemble du secteur étudié, les résultats issus de l'interprétation de la CC.IRC apparaissent meilleurs que ceux issus de l'ACP. L'amélioration est de l'ordre de 8 % quelle que soit la consistance du boisement.

Sur un type de visualisation comme sur l'autre, les forêts claires sont les plus difficiles à mettre en évidence. Les confusions avec les savanes boisées sont très fréquentes. Le seuil de 40 % de couverture du sol par les ligneux hauts ne correspond pas en effet à un seuil radiométrique. Les strates arbustives ou herbacées comme la nature du sol ont une incidence au moins aussi importante sur la radiométrie que celle des ligneux hauts.

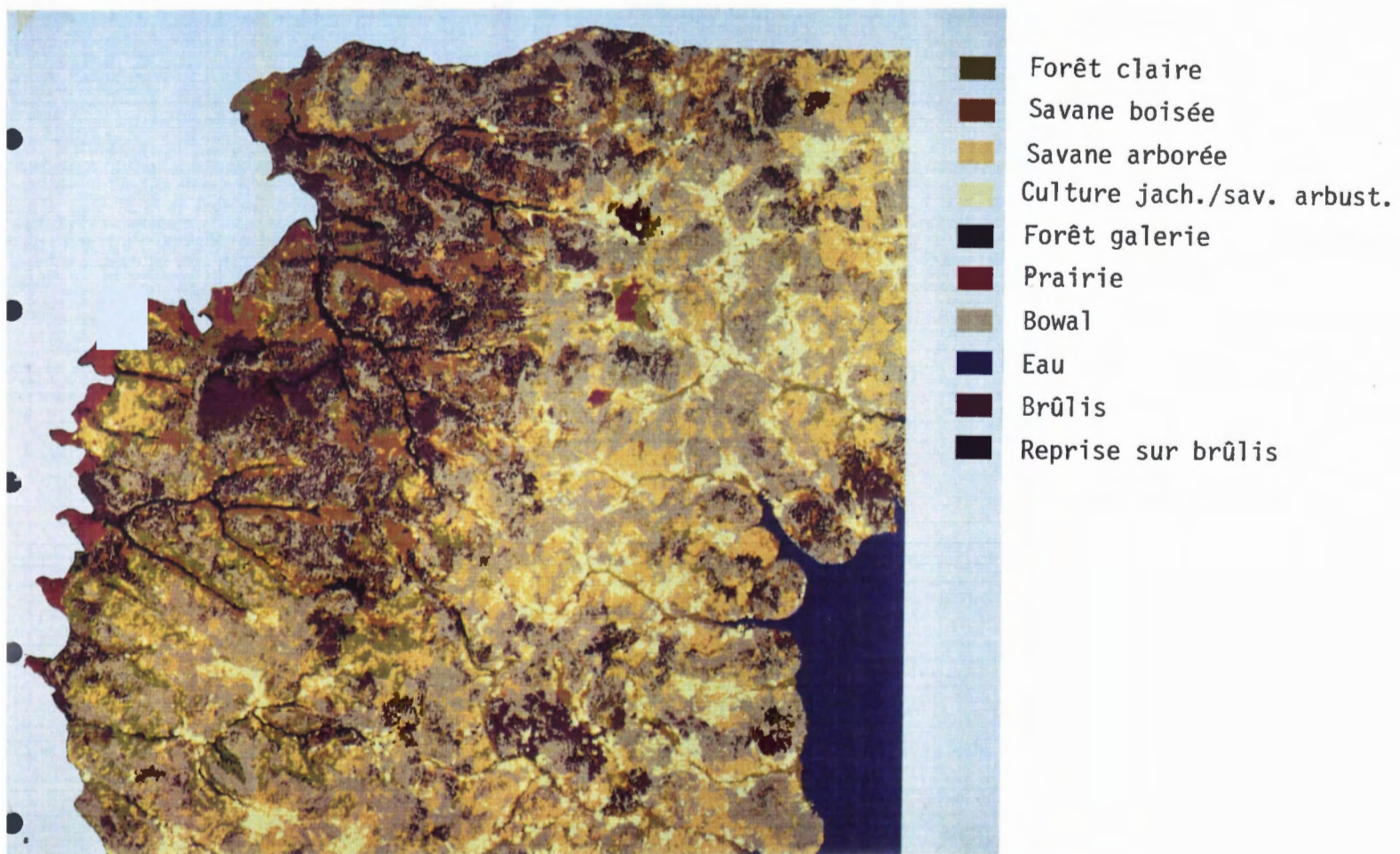
Le système des bowé / savane arborée par contre, défini entre autres critères par une consistance inférieure à 20 %, paraît plus aisé à mettre en évidence. 84,3 % d'entre eux ont été correctement cartographiés sur la CC.IRC et 76 % à partir de la CC.ACP.

25 Classification numérique supervisée

Les travaux ont été conduits à l'IGN sur un VAX 11/750 avec le logiciel TRIAS développé par cet organisme et comprenant environ 320 fonctions d'application et 150 000 lignes de programme écrites en Fortran et Assembleur.

La liste des traitements réalisés est la suivante :

- correction géométrique - étalement de dynamique radiométrique ;
- extraction de la zone d'intérêt ;
- classification supervisée ;
- masquages ;
- délimitation des unités primaires de l'inventaire et estimations des volumes de bois.

CLASSIFICATION NUMERIQUE SUPERVISEE

La méthode de classification utilisée est du type "maximum de vraisemblance". Différentes procédures ont dues être appliquées pour réduire les risques de confusion radiométrique.

La classification obtenue donne une légende à 10 thèmes :
forêt galerie, forêt claire, savane boisée, savane arborée, bowal, prairie, culture/habitat, eau, brûlis, reprise de végétation sur brûlis.

Pour juger de la précision des résultats une matrice de confusion a été calculée à partir de 1000 points de sondage (soit 30 % de la zone) disposés à l'intérieur des fenêtres repérées à la fois sur les photographies aériennes de 1987 et sur la classification.

La précision thématique (pour chaque thème de la classification on calcule la proportion qui correspond effectivement à ce thème sur le terrain) est satisfaisante pour la forêt galerie, l'ensemble culture-jachère et la prairie. Par contre les trois formations boisées (forêt claire, savane boisée et savane arborée) se confondent beaucoup.

Le thème bowal, typique et arboré, n'est pas trop mal représenté.

La précision cartographique (pour un thème relevé sur photos aériennes on note la proportion bien classée).

La forêt galerie, la forêt claire et le bowal typique sont les mieux repérés (densités de ligneux les plus tranchées).

En conclusion : il est illusoire avec ce mode de traitement de vouloir obtenir une classification précise, pour des formations végétales dont l'hétérogénéité est le facteur prédominant. La nomenclature définie sur le terrain est reprise sans grande difficulté à partir des photos aériennes. Par contre, l'hétérogénéité radiométrique des données SPOT est beaucoup plus difficile à gérer.

A partir de ces premiers résultats et pour obtenir une meilleure précision il est nécessaire d'opérer des regroupements de thèmes :

- forêt claire + savane boisée
- savane arborée + jachère/culture
- bowal typique et arboré
- prairie.

Même si elles apparaissent larges ces classes sont intéressantes dans le cadre d'un inventaire pour guider le système de sondage au sol. Il sera toujours possible d'améliorer cette première stratification par un échantillonnage de photographies aériennes récentes ou un pré-inventaire destiné à connaître à l'intérieur de chaque strate la variabilité des quantités recherchées.

26 Approche quantitative

En utilisant les mesures du PIRL sur la zone-test de Sorondian nous avons testé plusieurs stratifications :

- carte de la morphopédologie (carte du PIRL par photo-interprétation)
- carte des formations végétales (PIRL - photos aériennes)
- carte des densités de couvert (photo-interprétation)
- classification supervisée (SPOT).

La méthodologie et les calculs ne sont pas repris ici. Pour plus de détails le lecteur pourra se référer au rapport "Télédétection Spatiale et Inventaires Forestiers" de décembre 1989 ⁽¹⁾.

Au terme de cette étude quantitative le constat suivant a été fait : le plan de sondage est bien adapté aux stratifications "formations végétales" et "densités de couvert" mais très inadapté à la stratification morphopédologique. La classification SPOT donne évidemment un résultat moins précis mais encore raisonnable et considérablement plus simple à mettre en oeuvre (sous réserve de disposer de moyens informatiques).

3 ETUDE DE LA ZONE DE NIENENDOGOU

Pour valider les résultats acquis sur Sorondian, une autre zone-test du PIRL, Nienendougou a fait l'objet de traitements numériques.

31 Données utilisées

- bandes magnétiques CCT XS n° 042 328 et 042 329 du 21/02/1987.
- photographies aériennes panchromatiques de novembre 1983.
- cartes de la végétation et de la morphopédologie établies pour le PIRL.

32 Classifications numériques

Comme pour Sorondian des traitements utilisant l'algorithme du "maximum de vraisemblance" ont abouti à un document en 10 thèmes : forêt galerie, forêt claire, forêt dégradée, savane boisée, savane herbacée, savane hygrophile, bowal, prairie à vetiver, jachère/culture et surface minérale nu dépourvu de végétation.

Les résultats n'étant pas satisfaisants avec entre autre des confusions radiométriques à l'intérieur des formations boisées, une seconde classification a été établie avec un nombre plus restreint de classes. Même dans ce cas la précision obtenue est très moyenne et nous avons donc testé une autre méthode basée sur l'analyse des textures.

33 Segmentations

Ces méthodes permettent d'exploiter l'information géométrique contenue dans l'image.

¹ Télédétection Spatiale et Inventaires Forestiers - PNTS/CNRS-CNES-CTFT/IGN/IFN - Décembre 1989 - 75 pages.

Après lissage de l'image et détection des contours, les zones obtenues ou "segments" sont classés et on obtient une carte des types de paysage à six postes :

- proportion importante de forêt claire
- mélange de forêt claire et de forêt dégradée
- dominance de forêt dégradée
- surfaces graminéennes peu arborées et cuirasses
- zones brûlées
- zones cultivées et sol nu.

Après vérification les résultats se sont avérés satisfaisants et cette méthode permet de compléter une analyse basée sur les radiométries qui pour un milieu aussi hétérogène donne des résultats souvent décevants.

4 CONCLUSION

En résumé l'objectif de cette recherche était d'analyser la place des données satellitaires, données SPOT en l'occurrence, pour la réalisation d'un inventaire forestier en zone sèche.

Quatre équipes ont participé à ce projet apportant chacune leur spécificité et leur connaissance ce qui explique la diversité des approches méthodologiques :

- analyses visuelles de documents standards et de documents améliorés ;
- analyses numériques : classifications radiométriques, segmentations.

L'évaluation et la comparaison des résultats obtenus sont à envisager à plusieurs niveaux :

- Pour une stratification dans le cadre d'un inventaire les différentes approches peuvent être considérées comme sensiblement équivalentes :

- . l'étude visuelle des compositions colorées standards a le mérite en faisant appel à des moyens simples d'être facilement réalisable. La procédure peut sembler un peu longue mais cet inconvénient, en grande partie dû à l'utilisation d'informations exogènes (morphopédologie - végétation) rend la méthode plus précise donc plus intéressante ;
- . l'utilisation visuelle de documents améliorés constitue une solution intermédiaire. Dans le cadre de ce projet on a comparé les résultats de l'interprétation visuelle d'une composition colorée améliorée de type IRC et d'une composition colorée réalisée à partir des composantes d'une ACP. D'autres visualisations pourraient être envisagées, voire même combinées afin d'aboutir à une meilleure discrimination de certains thèmes ;
- . les traitements numériques sous forme de classifications radiométriques donnent des résultats acceptables à condition de simplifier la légende. Cette méthode appliquée à un milieu végétal aussi hétérogène et utilisant les données radiométriques d'un capteur "haute résolution" s'est révélée nettement incomplète, d'où un essai de segmentation réalisé en complément. Bien que les

résultats soient tout-à-fait satisfaisants, les essais ayant été faits sur une zone restreinte il est difficile de formuler ici un jugement correct sur leur efficacité appliquée à l'échelle régionale.

- Pour une corrélation entre les volumes mesurés sur le terrain et les données satellitaires.

Cette approche compare plusieurs types de stratification en utilisant les estimations de volume calculées d'après le plan de sondage du Projet d'Inventaire des Ressources Ligneuses (PIRL) sur la zone de Sorondian.

Les stratifications réalisées par photo-interprétation (végétation - densité du couvert) sont les meilleures mais également les plus coûteuses à réaliser. La classification SPOT, bien que moins précise donne des résultats utilisables et rapides à mettre en oeuvre sur système informatique.

- Pour une cartographie de la végétation la précision à obtenir doit être supérieure d'où le besoin de mettre en oeuvre une procédure plus complète donc plus lourde intégrant au maximum le visuel, le numérique, les différents niveaux de perception disponibles, toutes les données exogènes existantes. Ce niveau de travail peut être facilité avec l'utilisation d'un Système d'Information Géographique.

Le résultat le plus satisfaisant ne peut venir que d'une combinaison maximum d'approches, solution idéale certes mais très souvent freinée par des contraintes diverses : coûts, délais, absence de moyens, etc... Il faut donc savoir rester souple dans le choix d'une procédure et utiliser une grande diversité de documents.